

Évolution des émissions du dioxyde de carbone à Rosemont :  
utilisation du bioéthanol dans des bus de la société de  
transport de Montréal

par

Wendinmanegde Lydia Muriel COMPAORE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT  
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 03 AOÛT 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Wendinmanegde Lydia Muriel Compaore, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**  
**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. François Morency, directeur de mémoire  
Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, président du jury  
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Robert Hausler, membre du jury  
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 05 JUILLET 2018**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## **REMERCIEMENTS**

Je remercie mon directeur de mémoire, M. François Morency pour sa disponibilité et son écoute précieuse tout au long de ma maîtrise.

À Mme Mariam SOU/DAKOURE et Ulrich Landry COMPAORE qui ont été de grands conseillers dans la rédaction de ce travail, je leur dis merci surtout pour le temps accordé.

Je dédie principalement ce travail :

- à mes parents qui me donnent toujours le goût d’aller plus loin et de me dépasser dans la vie.
- à mon époux pour son soutien, son amour, sa patience malgré la distance.
- à mes frères pour qui je me dois d’être un exemple.

Je dis finalement merci à tous ceux ou toutes celles qui de près ou de loin ont contribué à la bonne marche de ce mémoire.



# **ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DU DIOXYDE DE CARBONE À ROSEMONT : UTILISATION DU BIOÉTHANOL DANS DES BUS DE LA SOCIÉTÉ DE TRANSPORT DE MONTRÉAL**

Wendinmanegde Lydia Muriel COMPAORE

## **RÉSUMÉ**

Le transport est majoritairement responsable de l'émission de gaz à effet de serre (GES) dans certains milieux urbains notamment certaines localités québécoise, entre autres Montréal. De nos jours, l'utilisation du biocarburant comme combustible dans les transports en commun est perçue comme un moyen de réduction des GES (Amela et al, 2017). Cette étude vise à transcender au-delà de la perception tout en observant les quantités d'émissions polluantes (principalement le CO<sub>2</sub>) selon l'utilisation de bioéthanol à Rosemont à travers un scénario de base bien défini. Les différentes étapes considérées dans le scénario sont la collecte, le transport et l'utilisation du bioéthanol. En effet, il est difficile de considérer les émissions de CO<sub>2</sub> tout en ayant une vision globale. La démarche suivie dans cette analyse tient compte du bilan carbone de l'utilisation du carburant E20 dans les bus de la STM. La biomasse utilisée pour la production du bioéthanol est essentiellement les déchets (feuilles et branches) de la végétation urbaine de Rosemont dont la frontière temporelle est estimée à une année.

Les résultats montrent qu'en mélangeant 20% en volume de bioéthanol (E20) et 80% en volume de combustible fossile (essence) dans les bus de la STM de Rosemont, le CO<sub>2</sub> émis baisse de 13,3% par rapport à des bus qui utiliserait uniquement de l'essence. Il faut noter que les émissions du au transport de la biomasse sont négligeables (soit 0,026% des émissions de CO<sub>2</sub> initiale des bus de la STM consommant que de l'essence). Les productions des biocarburants permettent de ressortir le besoin en biomasse qui y est assorties au besoin des bus. Ainsi l'abondance de la biomasse serait l'élément clé de la viabilité de la production de bioéthanol, en même temps du potentiel de réduction de CO<sub>2</sub>.

L'étude de sensibilité réalisée avec le logiciel VENSIM admettant uniquement une utilisation globale de bioéthanol (100% en volume) confirme que l'utilisation de bioéthanol réduit les émissions de CO<sub>2</sub> mais parviendrait également à les supprimer. Ce qui s'explique par le fait que les émissions de CO<sub>2</sub> dû à la consommation de E100 sont absorbées par les arbres pendant leur photosynthèse.

L'utilisation du bioéthanol pourrait se répandre au-delà des bus de la STM, la biomasse apparaissant comme une mine future. Les camions de transports de biomasse pourraient donc se déplacer avec du bioéthanol, afin d'éviter leur émissions de CO<sub>2</sub> (aussi minime soit elle) par la consommation de carburant fossile. Toutefois, la réalisation d'une étude nécessite complète à la fois la prise en compte des aspects environnementaux, économiques et sociaux. Ce qui n'est pas totalement le cas dans cette étude qui est axée sur des aspects environnementaux.

**Mots-clés** : pollution atmosphérique, Rosemont, végétation urbaine, bioéthanol, biomasses



## **EVOLUTION OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS IN ROSEMONT: USE OF BIOETHANOL IN BUSES OF THE MONTRÉAL TRANSPORTATION COMPANY**

Wendinmanegde Lydia Muriel COMPAORE

### **ABSTRACT**

Transportation is most important factor of greenhouse gases (GHGs) emission in certain urban areas such as Quebec. Nowadays, the use of biofuel as fuel in public transportation is seen as a good way to reduce GHGs (Amela et al, 2017). The goal of this study is to transcend beyond perception while observing the variations in polluting emissions (mainly CO<sub>2</sub>) according to the use of bioethanol in Rosemont through a well-defined basic scenario. Indeed, it is subtle to consider CO<sub>2</sub> emissions while having a holistic vision. The approach followed in this analysis takes into account the carbon footprint of the use of carburant E20 on STM buses. The biomass used for the production of bioethanol is essentially the waste (leaves and branches) of the urban vegetation of Rosemont whose time boundary is estimated at one year.

The results show that by mixing 20% by volume of bioethanol (E20) and 80% by volume of fossil fuel (gasoline) in an urban transportation bus in Rosemont emitted 13,3% less CO<sub>2</sub> than the bus which use only gasoline. It should be noted that emissions from transport of biomass are negligible (about 0.026% of the initial CO<sub>2</sub> emissions of the STM buses that use gasoline). The production of biofuels makes it possible to highlight the need for biomasses that are combined with the need for buses.

A sensitivity study with the VENSIM software is carried out by admitting only a global use of bioethanol (100% by volume) for the needs of the bus. It confirms that the use of this fuel in the transportation does not emit GHGs in the atmosphere because of the photosynthesis of the trees.

The use of bioethanol could be replaced by the STM buses, as biomass appears as a future mine. Biomass transport trucks could therefore move with bioethanol, in order to avoid their CO<sub>2</sub> emissions (also minimized) by the consumption of fossil fuel. However, carrying out a study requires taking into account environmental, economic and social aspects. This is not totally the case in this study which focuses on environmental aspects.

**Keywords:** atmospheric pollution, Rosemont, urban vegetation, bioethanol, biomass



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	2
CHAPITRE 1    REVUE DE LITTÉRATURE .....	5
1.1    La pollution atmosphérique .....	5
1.1.1    Définition de la pollution atmosphérique .....	5
1.1.2    Définition des gaz à effets de serre .....	5
1.1.3    Les sources de GES en milieu urbain .....	6
1.2    Les biocarburants: une source d'énergie renouvelable réduisant les GES .....	9
1.2.1    Le bioéthanol .....	10
1.2.2    Impact d'utilisation du bioéthanol sur les réductions de GES .....	12
1.2.3    Analyse de cycle de vie .....	13
1.2.4    Bilan carbone .....	15
1.2.5    Le logiciel VENSIM .....	16
1.3    Synthèse .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
CHAPITRE 2    PRINCIPE MÉTHODOLOGIQUE DES ÉMISSIONS DE CO <sub>2</sub> : UTILISATION D'ESSENCE ET DE BIOETHANOL .....	19
2.1    Estimation des émissions de CO <sub>2</sub> selon la combustion d'éthanol et d'heptane .....	21
2.2    Évolution des émissions de CO <sub>2</sub> des bus de la STM de Rosemont .....	21
2.2.1    Biomasse nécessaire à la production du bioéthanol .....	21
2.2.2    Production du bioéthanol et le pouvoir calorifique : Équivalence Bioéthanol/Carburant fossile .....	22
2.2.3    Évolution des émissions de GES des bus de la STM de Rosemont .....	24
2.3    Évolution des émissions de CO <sub>2</sub> selon la consommation en essence, bioéthanol : Simulation avec le logiciel VENSIM .....	25
2.3.1    Familiarisation au logiciel VENSIM .....	26
2.3.1.2    Flux d'entrée de biomasse .....	30
2.3.1.3    Lancer la simulation .....	32
2.3.2    Emissions de CO <sub>2</sub> selon le type de carburant .....	32
2.3.2.1    Scenario 1 : Émissions de CO <sub>2</sub> selon le carburant fossile .....	32
2.3.2.2    Scenario 2 : Émissions de CO <sub>2</sub> selon le bioéthanol .....	33
CHAPITRE 3    RESULTATS .....	35
3.1    Émissions de CO <sub>2</sub> selon la combustion d'un litre de chaque type carburant .....	35
3.2    Réduction de CO <sub>2</sub> des bus de la STM de Rosemont avec du E20 .....	37
CHAPITRE 4    DISCUSSION .....	47
CONCLUSION .....	51

ANNEXE I	PLAN DE RÉPARTITION DES LIGNES DE BUS DE LA STM À ROSEMONT.....	53
ANNEXE II	ÉMISSIONS DE CO <sub>2</sub> À TRAVERS LA COMBUSTION DE L'ESSENCE .....	55
ANNEXE III	ÉQUATIONS ALLOMÉTRIQUES PRÉDICTIFS DE BIOMASSES SÈCHES.....	57
ANNEXE IV	MASSES DE BIOMASSES DES ESPÈCES D'ARBRES DE ROSEMONT : UTILISATION DE CALCULATEUR.....	58
ANNEXE V	BIOMASSE PRÉDICTIVE D'ÉQUATION ALLOMÉTRIQUE.....	62
ANNEXE VI	DISTANCE PARCOURU DES BUS DE ROSEMONT EN UN PASSAGE.....	64
ANNEXE VII	NOMBRE DE PASSAGES DES BUS DE LA STM DE ROSEMONT...	65
ANNEXE VIII	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE DE L'HEPTANE ET DE L'ÉTHANOL .....	67
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	69

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 ..... Grandeurs associés aux sous-systèmes du scénario 1 .....	32
Tableau 2.2 ..... Grandeurs associés au sous-système d'utilisation de bioéthanol .....	34
Tableau 3.1 ..... Avancement d'une combustion complète d'heptane .....	36
Tableau 3.2 ..... Avancement d'une combustion complète d'éthanol .....	36
Tableau 3.3 ..... Besoin en carburant des bus passant par Rosemont .....	37
Tableau 3.4 ..... Comparaison des récoltes de biomasse .....	38
Tableau 3.5 ..... Quantité de biomasse selon l'émondage .....	39
Tableau 3.6 ..... Volume de bioéthanol équivalent en fonction de l'émondage .....	41



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1      Localisation de l'arrondissement de Rosemont dans Montréal.....	8
Figure 1.2      Schéma du cycle d'émission-absorption du CO <sub>2</sub> .....	10
Figure 1.3      Analyse de cycle de vie du biocarburant pour la réduction des GES.....	15
Figure 2.1      Cycle de vie du bioéthanol .....	20
Figure 2.2      Paramétrage du temps.....	27
Figure 2.3      Insertion de valeur initiale d'un réservoir.....	28
Figure 2.4      Flux de sortie de biomasse.....	29
Figure 2.5      Connecteur entre la biomasse et son transport vers l'usine.....	29
Figure 2.6      Convertisseur de la présence de biomasse selon le transport de biomasse vers l'usine.....	30
Figure 2.7      Insertion d'équation pour le flux sortant de la biomasse.....	30
Figure 2.8      Flux d'entrée de la biomasse .....	31
Figure 2.9      Équation pour le réservoir de biomasse.....	31
Figure 2.10      Émissions de CO <sub>2</sub> selon la consommation en carburant fossile.....	33
Figure 2.11      Émissions de CO <sub>2</sub> selon la consommation en bioéthanol .....	34





## LISTE DES GRAPHIQUES

	Page
Graphique 3.1    Évolution de la quantité de biomasses en fonction du taux d'émondage ...	39
Graphique 3.2    Évolution du volume de bioéthanol équivalent avec biomasse sèche	Erreur ! Signet non défini.
Graphique 3.4    Évolution du réservoir de biomasse sans la végétation.....	42
Graphique 3.5    Évolution de l'utilisation du carburant fossile .....	44
Graphique 3.6    Évolution des émissions de CO <sub>2</sub> .....	44
Graphique 3.7    Évolution des émissions de CO <sub>2</sub> selon la consommation de bioéthanol.....	45



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse du cycle de vie
AIE	Agence International de l'Énergie
AQLPA	Association québécoise de lutte contre la pollution de l'air
ASSSM	Agence de santé et de services sociaux de Montréal
CC	Changement climatique
CH <sub>4</sub>	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CDE	Connaissance des énergies
COVNM	Composés organiques volatils non méthanoïques
COV	Composés organiques volatils
Eq CO <sub>2</sub>	Équivalent Dioxyde de carbone
EU	États-Unis
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HFC	Hydrofluorocarbures
H <sub>2</sub> O	Vapeur d'eau
ICU	Ilots de chaleurs urbains



## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

g	gramme
l	litre
t	tonnes
tCO <sub>2</sub>	tonnes de dioxyde de carbone
km	kilomètre
kJ	kilojoule

## INTRODUCTION

Depuis ces dernières décennies, elle contient de plus en plus de particules et de gaz polluants tels que les gaz à effets de serre (GES) (Leslie, 2009). Ces derniers sont responsables de l'augmentation de la température de +1 °C durant les 50 dernières années (COP21, 2015). Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit un réchauffement d'environ 4 °C d'ici la fin du siècle si rien n'est entrepris pour réduire ces GES (GIEC, 2014). L'accord de Paris signé le 22/04/2016 engage 175 États, notamment les plus gros émetteurs de GES (les États unis [É.-U.], la Chine et l'Union Européenne), à réduire leurs émissions afin de limiter l'augmentation de la température à 1,5 °C d'ici 2050 (Almeida, 2015).

Le recours à l'énergie renouvelable est l'objet de questionnements récurrents, notamment de la part des autorités locales et nationales des pays du Nord et du Sud. Avec les effets confirmés du changement climatique, ces questionnements portés à l'échelle locale se retrouvent au cœur de l'agenda international du moment. Charlez dans son étude affirme que l'utilisation du pétrole est l'un des principaux contributeurs des GES (Charlez et al, 2014). Pour mieux cerner cet argument, IPCC mentionne qu'environ 14 % des émissions mondiales de GES sont dues essentiellement à l'utilisation de combustibles fossiles dans le transport routier, ferroviaire, aérien et maritime, dont 95 % de l'énergie du transport mondial provient de combustibles à base de pétrole (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014). Les experts d'Environnement Canada indiquent de manière spécifique que le pétrole dans le secteur du transport contribue à 26 % du total des émissions de GES au Canada (Environnement Canada, 2008).

Outre l'augmentation de la température, les GES ont d'autres impacts négatifs notamment sur la santé humaine en particulier. Ils seraient responsables dans le monde de plus de 2 millions de morts prématurées par an, dont 1,3 million directement dû aux pollutions urbaines (OMS, 2014). En Chine, la pollution atmosphérique tue près de 1,6 million de personnes chaque année (Renjie et al, 2015). Les préoccupations dictées par les enjeux de développement durable, et le souci de maîtriser les coûts d'exploitation dans un contexte de renchérissement du prix du gazoil incitent en effet à étudier de près l'option « combustible

alternatif » dans le domaine du transport. Ce projet de maîtrise s'inscrit dans cette optique de pensée durable dans l'utilisation du combustible en transport.

L'atténuation des GES est aujourd'hui un enjeu mondial. Le développement des transports en commun est l'une des solutions envisagées pour réduire la part d'émissions des voitures. La promotion et le développement des transports en commun sont de plus en plus préconisés dans les grandes agglomérations (Blais, 2004). Ces initiatives sont notamment associées à l'utilisation d'énergies vertes. Les États-Unis et le Brésil deviennent de gros producteurs de biocarburants. Ils contribuent à 85 % de la production mondiale (Stéphan, 2015). Le biocarburant est principalement utilisé dans le transport automobile, permettant une réduction de GES (Amela et al, 2017). Le biocarburant est-il capable de remplacer l'énergie fossile tout en étant viable à long terme pour préserver l'atmosphère des émissions de GES ?

Le transport collectif ou transport public en zone rurale utilisant de l'essence (les bus STM pour le cas de Montréal) présente une option de lutte contre les émissions de GES. Il est donc possible de dire que le rapport émissions de GES par personne est faible selon que le nombre de personnes à déplacer croît. Alimentés par du biocarburant, ces bus seraient logiquement une solution intéressante de réduction des émissions polluantes à long terme pour l'atmosphère. C'est du moins l'hypothèse sur laquelle se base le présent rapport, tentant modestement de répondre à certains nombres d'éléments liés au questionnement posé plus haut. L'objectif général de cette étude consiste à déterminer les émissions directes de GES de l'utilisation du biocarburant E20 dans les bus de la STM à Rosemont. Les sous-objectifs de l'étude sont les suivants :

- déterminer les émissions de CO<sub>2</sub> selon la consommation de carburant fossile : essence ;
- déterminer les émissions de CO<sub>2</sub> selon la consommation de biocarburant ;
- évaluer l'influence du mélange bioéthanol et carburant fossile sur les émissions de CO<sub>2</sub>.

Pour répondre à ces objectifs, le présent document a été subdivisé en chapitres. Le premier chapitre présente la revue de littérature portant sur les différentes études en rapport avec le sujet traité. Le deuxième chapitre détaille la méthodologie utilisée pour répondre aux objectifs fixés. Ensuite, le troisième chapitre présente et analyse les résultats. Les résultats sont ensuite interprétés sous la forme d'une discussion dans le quatrième chapitre.



## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LITTÉRATURE**

Dans cette étude, la revue de littérature répond principalement à la réduction des émissions GES dans le transport, par l'utilisation de biocarburants. Cette première partie du rapport commence par une description du phénomène de pollution atmosphérique. Ensuite, la revue de littérature présente des initiatives en matière d'atténuation des GES avec du biocarburant (principalement bioéthanol), tout en s'intéressant aux impacts de l'utilisation de bioéthanol dans le transport, permettant de répondre à l'intérêt de réduction des GES dans le transport.

#### **1.1 La pollution atmosphérique**

##### **1.1.1 Définition de la pollution atmosphérique**

La loi sur la qualité de l'environnement du Québec définit la pollution atmosphérique comme étant une dégradation de la qualité de l'air. La perturbation de la qualité de l'air peut être caractérisée par la présence dans l'air ambiant de substances polluantes. Les substances polluantes, par leurs aspects, leurs concentrations, leurs odeurs ou leurs effets physiologiques portent préjudice à la santé et à la sécurité publique ou à l'environnement (L.R.Q, 2016). Les activités humaines telles que le transport et les industries engendrent les émissions polluantes qui se propagent dans l'atmosphère. Les émissions polluantes sont l'ozone (O<sub>2</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), le monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatils non méthanoïques (COVNM), particules, dioxine... ((Tvinnereim et al, 2017).

##### **1.1.2 Définition des gaz à effets de serre**

L'effet de serre est un phénomène naturel provenant du comportement des différents flux thermiques de l'atmosphère, offrant la température normale d'un milieu (Environnement

Canada, 2015). Mais des émissions polluantes (GES) seraient capable de créer une perturbation artificielle de la surface : baisse d'albédo et élévation de la température (îlots de chaleur). Cet ensemble de changements (présence de polluants, modification artificielle de la surface) dans l'atmosphère entre en compte dans la formation des îlots de chaleurs. La modification de la composition chimique de l'atmosphère par l'accumulation de GES (qui piègent la chaleur et la réfléchisse vers la surface de la Terre) est la cause principale du changement climatique (CC) (Filiatreault, 2015). Par exemple au Québec, une prévision de réchauffement du climat est attendue d'ici 2050, de 1°C à 6 °C dans le Sud et de 2°C à 9 °C dans le Nord (Langlois et al, 2004).

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) recense plus d'une quarantaine de types de GES : la Vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), le Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le Méthane (CH<sub>4</sub>), l'Ozone (O<sub>3</sub>), le Protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), l'Hydrofluorocarbure (HFC), le Perfluorocarbure (PFC) et l'Hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) (GIEC, 2013). C'est principalement la vapeur d'eau et le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) qui retiennent la chaleur autour du globe (Sottile, 2011). Mais le CO<sub>2</sub> est le GES principalement responsable du changement climatique à travers les activités humaines (Petit, 2016). Le volume de GES présent dans l'air est souvent exprimé en équivalent de tonnes de CO<sub>2</sub>. Ce qui constitue l'unité de référence pour les autres gazs (Langlois et al, 2004). L'unité de référence se rapporte au potentiel de réchauffement global (PRG). Le PRG est un indicateur qui vise à regrouper sous une seule valeur l'effet cumulé de toutes les substances contribuant à l'accroissement de l'effet de serre (GIEC, 2007). L'effet de serre attribué au CO<sub>2</sub> est fixé à 1 et celui des autres substances relativement au CO<sub>2</sub> (GIEC, 2007). Cet indicateur est calculé sur la base d'un horizon fixé à 100 ans afin de tenir compte de la durée de séjour des différentes substances dans l'atmosphère (GIEC, 2007).

### **1.1.3 Les sources de GES en milieu urbain**

La Chine est responsable des deux tiers de la consommation en charbon dans le monde (Ou et al, 2009). Les émissions de GES en Chine sont dues en grande partie à l'utilisation du charbon, surtout dans l'industrie électrique (Deziel et al, 2009). Les émissions de CO<sub>2</sub>

occupent : 82,45 % des combustibles de charbon (Agence International de l'Énergie : AIE, 2007), 15,86 % des combustibles de pétrole et 1,69 % des gaz naturels (Deziel et al, 2009).

Contrairement à la Chine, dans d'autres pays les GES sont principalement émis par les activités consommatrices de pétrole. Au Canada, précisément au Québec, 52 % des émissions de GES sont dues à la combustion du pétrole (Martin et al, 2015). Parmi les activités consommatrices de pétrole, le transport automobile est le premier émetteur de GES, suivi de loin par les industries et le chauffage (mazout, bois, propane, etc.) (Leslie, 2009). Au Canada, 75 % de la consommation totale de pétrole est affectée aux activités de transport (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN 2016)). Plusieurs études font état de l'incidence du transport sur la qualité de l'air (Taylor, 2001). D'après le MERN du Canada, la consommation du pétrole est dans tous les secteurs : commercial, industriel, résidentiel et transport. Au Québec le secteur industriel représente environ 14 % de consommation en pétrole, en avant du commercial d'environ 6 % et du résidentiel d'environ 4 %. Pendant ce temps, le transport représente à lui seul environ 76 % des consommations en pétrole (MERN, 2016).

- **Rosemont : un arrondissement montréalais au Québec**

Situé au Canada, dans la province du Québec, Rosemont est un arrondissement de la ville de Montréal (Figure 1.1). Il s'étend sur une superficie de 15,9 kilomètres carrés (km<sup>2</sup>) avec une population estimative de 140 764 habitants et une densité de 8 457 habitants par km (hab/km) en 2011 (Statistiques Montréal, 2014). Pour les habitants de Rosemont, la voiture reste le moyen de déplacement le plus utilisé dans l'arrondissement. La mobilité à Rosemont occupe environ 43,7 % en utilisation de voiture, 40,7 % en transport en commun et seulement 15,6 % en transport actif (Statistique Canada, 2011). La Société de Transport de Montréal (STM) répond aux besoins collectifs du déplacement de la population locale par le système de métro et celui des bus ; et intervient pour réduire les GES. Cela s'explique par le fait que le transport en commun est l'une des solutions de lutte contre les GES comme l'indique le protocole Kyoto (Cyr, 2003). Le transport en commun permet de réduire les émissions de

GES, car il transporterait plus de personnes en un trajet qu'une voiture de ménage (Poluga, 2011). Ainsi existe une diminution des véhicules dans une localité, en même temps une diminution de la consommation en carburant (Poluga, 2011).



Figure 1.1 Localisation de l'arrondissement de Rosemont dans Montréal<sup>1</sup>

En 2015, un total de 1 721 bus est présent sur toute l'île de Montréal (499,2 km<sup>2</sup>) avec un service de parcours de 220 lignes (STM, 2015). Soit un service des autobus de la STM desservie dans Rosemont selon le plan de l'annexe I où apparaissent différentes lignes : lignes fréquentes de jours à chaque 10 minutes (13, 25, 30, 31, 46, 47, 55, 160, 161, 197) et lignes de nuits (variant de chaque 10 minutes à chaque 45 minutes) (361, 363, 370) (STM, 2017). Les lignes de nuits sont fonctionnelles quand le métro et le réseau de jours ne fonctionnent plus (Plan de déplacement Rosemont : (PDR, 2017).

Les 220 lignes de parcours des bus de la STM dans Montréal permettent aux bus d'atteindre 83,5 millions km en 2015, avec une consommation moyenne par bus de 65 litres (L)/100 km en énergies fossiles (STM, 2015). La consommation moyenne en carburant est obtenue par une technique d'analyse des ingénieurs de la STM dans le cadre d'évaluation des autobus (STM, 2015). La technique d'analyse est basée sur la performance générale des bus. Elle **prend** en considération de la consommation de carburant en fonction de la distance parcourue

<sup>1</sup> Carte de localisation

[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/lib\\_arr\\_fr/media/documents/carte\\_arr\\_rpp.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/lib_arr_fr/media/documents/carte_arr_rpp.pdf)

(STM, 2015). Une méthode **est** appliquée également dans le projet Biobus pour l'estimation de la consommation d'énergies fossiles dans le transport en commun (Biobus hydrique, 2009).

Les villes feront toujours face aux émissions de GES malgré l'utilisation du transport en commun si elles continuent d'utiliser l'énergie fossile. Car selon Ressource Naturelle Canada (RNCAN), pour chaque litre d'essence utilisé, environ 2,3 kilogrammes (kg) de CO<sub>2</sub> sont produits (RNCAN, 2014). Cette estimation est faite sur la base où RNCAN considère que les émissions de CO<sub>2</sub> sont directement proportionnelles à la quantité de carburant consommée, selon un bilan chimique (Annexe II). Le bilan chimique tient compte de la formule chimique du carburant fossile utilisé, en exemple de la formule chimique du gazole ou diesel (C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>), essence (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> pour l'heptane et C<sub>8</sub>H<sub>18</sub> pour l'octane) (Seloua, 2006).

Il existe de nos jours, certains calculateurs permettant d'estimer directement les émissions de GES pour divers secteurs d'activités (industriel, commercial, transport...). Le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC) présente le calculateur GES FAQDD (Fond d'Actions Québécois pour le développement durable) (MDDELCC 2017). C'est un outil permettant de calculer les émissions de GES associées à trois secteurs d'activités québécois: les transports, les matières résiduelles et les bâtiments (MDDELCC, 2017). Il est inspiré du calculateur de GES dans le cadre du projet "Vers de grands festivals carboneutres", incorporé au Greenhouse Gas Protocol (FAQDD, 2008).

## **1.2 Les biocarburants: une source d'énergie réduisant les GES**

D'après l'Association québécoise de lutte contre la pollution de l'air (AQLPA), la végétalisation urbaine apparaît comme une alternative potentielle de production de biocarburants et de réduction de GES dans le domaine du transport. Les produits tels que les cultures, les feuilles, les tiges sont des produits de la végétalisation urbaine permettant de produire du biocarburant. Les produits de la végétalisation sont des réducteurs d'émissions de GES, à travers les biocarburants. D'abord, les biocarburants n'émettent pas de NOx ou de

SO<sub>x</sub> comme les carburants à base d'énergie fossile (Santé Canada, 2012). Ensuite en se rapportant à la figure 1.2, contrairement aux carburants fossiles, les biocarburants offriraient une suppression des GES, puisque les CO<sub>2</sub> émis lors de la combustion des biocarburants dans l'atmosphère ont été préalablement fixés par les plantes lors de la photosynthèse (Connaissance des énergies [CDE], 2016). Les carburants fossiles résultent de la décomposition de plantes, captant préalablement le CO<sub>2</sub>. Le problème est que l'homme libère en une très courte période de temps le CO<sub>2</sub> des carburants fossiles, empêchant les plantes de tous les absorber (Landrieu, 2014).

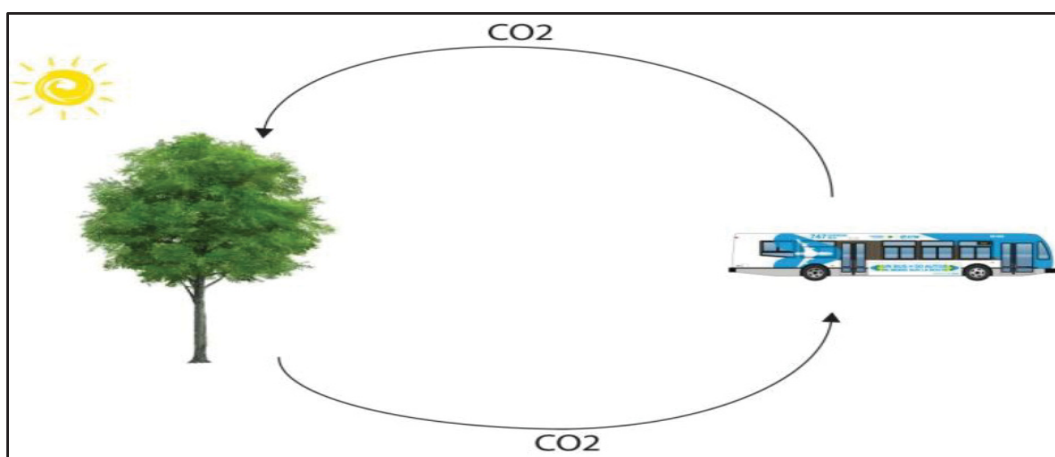


Figure 1.2 Schéma du cycle d'émission-absorption du CO<sub>2</sub>

### 1.2.1 Le bioéthanol

Les Etats-Unis (EU) restent sur le plan international l'un des grands producteurs de biocarburants, précisément le bioéthanol (Bronson-Consulting-Group et EurObserv'ER, 2004). Les EU **sont** passés d'une production de bioéthanol de 19 milliards de litres en 2006 à 39 milliards de litres en 2009. Le Canada quant à lui possède une production de 840 millions de litres de bioéthanol en 2007 contre 3,1 milliards de litres en 2007 (CAAAQ, 2010). Quelle que soit la source de pollution de GES, différents pays du monde s'attèlent à la lutte contre la pollution atmosphérique avec le bioéthanol comme carburant de substitutions (Watson, 1996).

L'éthanol ( $C_2H_6O$ ) est l'alcool de substitution du bioéthanol (Terrier, 2005). L'éthanol peut être fabriqué par fermentation des sucres – provenant : de céréales comme le blé ou le maïs - à l'aide de levures, ou des cultures dédiées en milieux urbains, forestiers (taillis à croissances rapides) (Kpogbemabou, 2006). Les cultures dédiées en milieux urbains renferment de la biomasse pouvant devenir la matière première de la fabrication du bioéthanol (Kpogbemabou 2006).

L'estimation de la biomasse des plantes est basée sur bon nombre d'équations. Ces équations sont présentées par Navar comme étant sur une série de 229 équations allométriques, tenant compte des diamètres de 102 espèces d'arbres, différentes dans 72 communautés forestières des écosystèmes latino-américains (Navar, 2008). L'annexe III présente un ensemble de modèles d'équations allométriques prédictifs de biomasses sèches (Chave et al, 2005 ; Henry et al 2010 ; Vieilledent et al 2012). (Moundounga, 2012) s'appuie sur ses modèles d'équations pour comparer ses résultats d'études tout en affirmant que le modèle 4 de l'annexe III est le meilleur. Leboeuf quant à lui s'était appuyé sur le même modèle pour déterminer la biomasse de peuplements d'épinettes noires en forêts subarctique (Leboeuf, 2005). Les équations allométriques sont des équations applicables au nombre d'espèces présentes dans une localité pour déterminer la biomasse des arbres. Mais la quantité de biomasses contenue dans les branches, troncs ou écorces d'un arbre au Canada peut être obtenue directement grâce à un calculateur disponible sur le site « Ressources naturelles Canada (RNCAN) », en entrant comme données : le diamètre de l'arbre et/ou sa hauteur (Pare, 2013). Le calculateur RNCAN provient d'un modèle de base de calcul de biomasse des arbres du Canada (RNCAN, 2016). Le modèle de base et les paramètres de base du calculateur sont décrit et mis à jour dans le rapport intitulé ``Model-based volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada`` du Service Canadien des forêts (Boudewyn et al, 2007). Le modèle de base prend en compte le diamètre de 10 arbres d'espèces différentes qui ont permis de définir une équation (Boudewyn et al, 2007). L'un des chercheurs scientifiques du service canadien des forêts (du nom de Pare) ayant contribué

à concevoir l'outil affirme que le calculateur permettrait de comprendre les avantages liés à la valorisation des résidus forestiers (Blais, 2016).

Rosemont a un taux de canopée à couvert feuillus de 19,44% en dessous de la moyenne montréalaise de 20% (Béland, 2011). Un inventaire des arbres urbains de la forêt canadienne est stocké dans des bases de données (Penner et al, 1997). Au Québec par exemple, la banque de données Québec stocke l'ensemble des arbres (toutes espèces confondues) selon les municipalités (Données Québec, 2016). Le logiciel I-Tree Streets peut estimer la quantité d'arbre d'une localité, même si le logiciel est développé spécifiquement pour les États-Unis (Chicoine, 2012). C'est-à-dire que le logiciel offre le nombre d'arbre d'une localité désiré en fonction d'une similarité de territoire des États-Unis. Le logiciel I-Tree Streets est un logiciel de scientifiques "Us Forest Research" permettant de quantifier les arbres d'un milieu urbain (Belanger, 2012). Belanger en utilisant ce logiciel dans une de ses études, arrive à estimer le nombre d'arbres de Rosemont à 26 500 arbres en 2012 avec une augmentation de 10 875 arbres pour les 5 prochaines années (Belanger, 2012). Mais l'estimation de ses arbres ne tient pas compte des arbres privés de Rosemont (Belanger, 2012).

### **1.2.2 Impact d'utilisation du bioéthanol sur les réductions de GES**

L'éthanol possède une combustion plus complète, efficace et propre, ce qui fait de lui un carburant oxygéné (Terrier, 2005). Plusieurs essais ont été faits pour des mélanges variant de 10 % à 100 % d'éthanol (Liguang et al, 2003). La majorité des essais présente des réductions significatives notamment sur le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures (HC), avec des valeurs qui sont fonction du régime de charge et du type de moteur pour un carburant équivalent (Terrier, 2005). Le projet Ethanol Greenfield parvient à réduire environ 234 000 tonnes nettes d'émissions de CO<sub>2</sub> par la production de 120 millions de litres (Ethanol Greenfield 2010). Chang et al démontrent que l'utilisation de l'E85 (15% énergie fossile, 85% bioéthanol) réduirait les GES de 59,4 % (Chang et al, 2017). L'utilisation de bioéthanol de deuxième génération réduit davantage les émissions de GES au Québec (6 à 8 % pour un mélange E10) que le bioéthanol fabriqué à partir de maïs (3 à 4 % pour un mélange E10)



(Brodeur et al, 2008). Une tonne de biomasses sur la base de matières sèches produirait actuellement entre 200 et 230 l d'éthanol selon le centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (Brodeur et al, 2008). Au Canada, l'un des premiers projets favorisant la production de biocarburant de deuxième génération est le projet Enerkem (Hebert, 2013). Il parvient avec le projet Ethanol Cellulosique Varenne, à réduire 110 000 tonnes par an des émissions de CO<sub>2</sub> sur une production de 38 millions de litres de bioéthanol (Hebert, 2013).

### **1.2.3 Analyse de cycle de vie**

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode permettant l'évaluation d'impacts environnementaux globaux d'un produit, d'un service, d'une entreprise ou d'un procédé (Gonzalez et al, 2015). Elle est définie par les normes de l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) (Gonzalez et al, 2015). Il existe deux types d'approches d'ACV (Sandén et Karlstrom, 2007) :

- l'analyse du cycle de vie attributionnelle (ACV-A), cartographiant les impacts environnementaux dus à la responsabilité d'un produit;
- l'analyse du cycle de vie conséquentielle (ACV-C), analysant les conséquences d'un changement.

Le premier type d'ACV-A décrit les flux physiques environnementaux pertinents du système de produits à l'étude, alors que l'ACV-C analyse les impacts d'une prise de décisions (Ekvall et Weidema, 2004). L'ACV se fait par scénarios ou par l'utilisation de modèles analysant les variations mondiales des marchés (Shirley, 2008). Pour les scénarios, il faut parvenir à identifier de façon méthodologique le processus affecté par les changements sur une localité (Shirley 2008). Mais pour l'utilisation des modèles à variations mondiales des marchés, il faut avoir la possibilité de modéliser les changements observés sur une localité (Shirley, 2008).

Par l'utilisation d'un scénario de l'ACV-C, l'auteur Schmidt se penche sur l'agriculture et les variations de demande d'un produit céréalier au Danemark. Schmidt est à la recherche de l'augmentation de la demande en blé. Le cadre et les lignes directrices qui l'accompagnent concernent : les fournisseurs concernés, l'augmentation de la production (superficie ou rendement) et les substitutions entre les cultures. Il utilise un flux de référence de blé (1 kg) et adapte sa méthode aux principes généraux d'ACV-C. Bien que simplifiées, les variations de l'offre de la demande sont considérées (Schmidt, 2008).

Cette étude peut être mise directement en relation avec les analyses pour les biocarburants. Mais comme certaines sources de biomasses se récoltent selon la localité, il faut alors inclure une extension des frontières de récoltes dans les processus répondant au manque engendré (Schmidt, 2008). C'est-à-dire que si la quantité de biomasses récoltée dans la localité d'étude pour la production du biocarburant n'est pas suffisante, il serait possible de faire une récolte de biomasses à plus grande échelle. La récolte de biomasse à grande échelle pourrait être stockée dans des friches industrielles pour une meilleure utilisation de l'espace, et éviterait d'investir dans de nouvelles localités (Fontaines et al, 2012).

L'ACV est une méthode employée dans les études sur les biocarburants. Mais il n'existe pas d'ACV spécifique aux carburants de deuxième génération (Seguin, 2013). En 2008, Shirley dans son mémoire fait une comparaison analytique entre ACV-A et ACV-C d'un nouveau biocarburant E85 de deuxième génération produit à base de saule. Cette analyse inclut les étapes du puits de pétrole à la roue : c'est-à-dire l'extraction, le transport, le raffinage, la production et l'utilisation du carburant dans les véhicules. Tandis que Chang et al, 2017, appliquent une ACV-C pour observer l'impact de réduction de GES sur les véhicules avec l'utilisation de biocarburants partant : la récolte de la matière première à la combustion de biocarburant de deuxième génération (Ballerini, 2011). La figure 1.3 présente de scénario d'analyse de cycle de vie du biocarburant de l'étude de Chang et al. La figure 1.3 se divise en deux étapes : l'étape de la biomasse au réservoir et l'étape du réservoir à la roue. L'étape de la biomasse au réservoir implique la production de la matière première et avec des biocarburants disponibles dans le réservoir de carburants des véhicules. L'étape du réservoir

à la roue couvre toutes les activités de conduite des véhicules, donc d'émissions et de possibilité de réductions de GES (Chang et al, 2017).

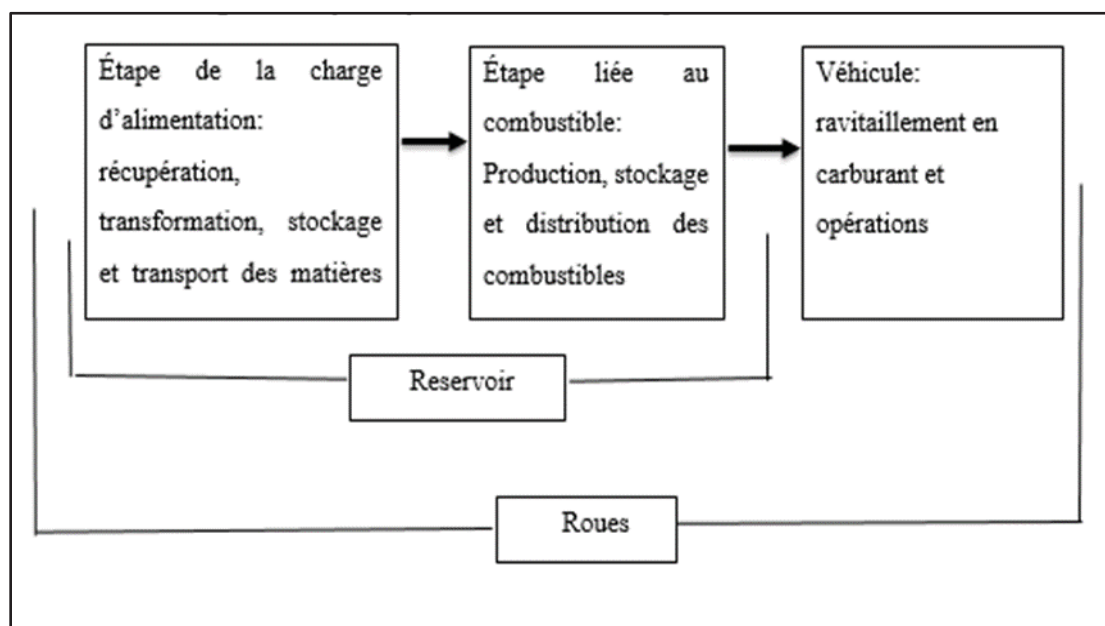


Figure 1.3 Analyse de cycle de vie du biocarburant pour la réduction des GES  
Tirée de (Chang et al, 2017)

#### 1.2.4 Bilan carbone

Le bilan carbone ou empreinte carbone est une méthode de détermination des émissions directes ou indirectes de GES selon des données d'activité disponible (Joyce 2011). Il est la somme des flux entrants et sortants associés aux différentes étapes du cycle de vie d'un produit (WRI et WBCSD, 2011). Le bilan carbone s'applique à toute activité : entreprises industrielles, administrations, collectivités et territoire géré par les collectivités (Joyce 2011). C'est un outil développée par l'ADEME avec la norme ISO 14064, initiative GHG Protocol et les termes de la Directive "permis" n° 2003/87/CE relative (ADEME, 2016). Plusieurs études ont déjà eu lieu à travers le bilan carbone. Il porte sur les cultures (Hillier et al., 2009 ; Gan et al., 2011 ; Cheng et al., 2011), les fermes (Topp et Rees, 2008)... (ADEME, 2017) dans son rapport sur le bilan carbone des biocarburants, parvient à conclure que les biocarburants réduisent les émissions de GES car il demande plus d'énergie pour sa

production. Le bioéthanol réduirait les émissions de 50 à 70%, tandis que l'ETBE (éthyl tertio butyl éther) ne permet une réduction que de 25 à 50% (ADEME 2017).

### 1.2.5 Le logiciel VENSIM

Le logiciel VENSIM est un logiciel de modélisation de flux capable de simuler un système dynamique (Cabalero, 1998). VENSIM permet d'obtenir des graphiques à partir de systèmes étudiés par l'intermédiaire de flux reliés à des variables d'État, selon une période (Covarrubias, 1996). Un outil mathématique qui y est intégré permet l'établissement d'équations et de fonctions complexes (Covarrubias, 1996). L'utilisateur du logiciel est donc contraint à distinguer les flux et les variables d'états selon le modèle d'étude. C'est un bon outil performant pour faire une simulation de l'évolution des systèmes (Jin Lee, 1993).

Le champ d'application de VENSIM n'est limité à aucun domaine spécifique. Avec VENSIM, Sbughea (2016) observe la trajectoire évolutive de systèmes sur un modèle classique dynamique de processus de production. Mohammad et Alexandru (2014) quant à eux utilisent VENSIM pour observer l'évolution d'un modèle de chaîne d'approvisionnement d'une usine de volaille. Par contre Shahgholian et al, analyse à partir de VENSIM l'évolution de la pollution atmosphérique à Téhéran et sa relation avec la santé et la croissance démographique (Shahgholian et al, 2009).

## 1.3 Synthèse

Au vu de la documentation faite de la pollution de l'air, il ressort que le réchauffement climatique qui est un phénomène attribué principalement à l'augmentation des GES dans l'atmosphère (en particulier le CO<sub>2</sub>). Le pétrole apparaît comme la source principale des émissions de GES dans certains milieux urbains, notamment au Québec. Au Québec, le transport est le principal émetteur de GES par l'utilisation du pétrole.

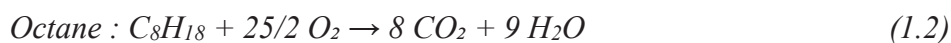
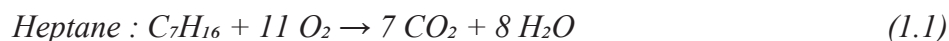
Le transport en commun serait une solution de lutte contre les émissions de GES en réduisant la consommation en énergie fossile. Mais il reste un émetteur de GES par continuité d'utilisation de l'énergie fossile. Donc pour soulager le problème d'une localité urbaine

menacée par les GES avec l'utilisation du carburant fossile dans le transport, la production de biocarburants est une solution envisageable. Le bioéthanol produit à partir de biomasse urbaine semble être une bonne alternative sur la base que cette matière première est d'une accessibilité facile et sans concurrence alimentaire. Malgré cette accessibilité facile des matières premières, le territoire doit produire une biomasse importante pour la production du bioéthanol. Le bioéthanol est donc un biocarburant capable d'être produit sur une localité à petite comme à grande échelle selon le territoire d'étude. Pour observer l'estimation de réduction de CO<sub>2</sub> par l'utilisation de bioéthanol, la méthode d'analyse de cycle de vie de biocarburant, le bilan carbone sont des outils envisageables applicables à divers scénarios d'études. Le logiciel VENSIM quant à lui est un logiciel capable de simuler et d'observer des scénarios d'un modèle d'étude.

#### 1.4 État de connaissances

Le bioéthanol E20 est un biocarburant déjà utilisé dans des bus de la STM de Montréal, et l'essence est le carburant le plus utilisé dans la majorité des bus (STM 2013). Le mélange E20 et essence sont produits à partir de 20 % de bioéthanol et de 80 % de carburant d'origine fossile. L'E20 est mélangé à l'essence heptane dans le présent rapport. Le choix sur l'heptane (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>) se rapporte au fait qu'il pourrait être considéré moins polluant que l'octane (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) par le coefficient de stœchiométrie du dioxyde de carbone de chaque équation chimique de combustion. Ainsi les équations (1.1) et (1.2) montrent :

- pour une mole d'heptane, 7 moles de CO<sub>2</sub> sont libérées;
- pour une mole d'octane, 8 moles de CO<sub>2</sub> sont libérées.



L'heptane sera utilisé comme carburant de référence et le E20 et fera l'objet d'une comparaison en ce qui concerne la production d'énergie exprimée en kilojoules ainsi que

l'émission de  $\text{CO}_2$ . Ce qui permettra d'étudier la réaction de combustion de carbone selon l'heptane et l'éthanol.

## CHAPITRE 2

### PRINCIPE MÉTHODOLOGIQUE DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> : UTILISATION D'ESSENCE ET DE BIOETHANOL

Le biocarburant intégré dans le transport en commun est une solution de réduction des émissions de GES. La zone d'étude prise en considération dans la première étape de ce rapport est l'arrondissement de Rosemont à Montréal. Le choix se porte sur l'arrondissement de Rosemont pour restreindre la zone d'étude sur Montréal, et aussi à titre d'exemple comme toute zone urbaine faisant face à la pollution atmosphérique.

Cette étude est basée sur l'analyse des émissions directes de GES causées par l'utilisation du biocarburant E20 dans les bus de la STM à Rosemont. L'étude offre un modèle tenant compte de cinq éléments importants comme l'indique la figure 2.1 :

- la production de biomasse;
- la récolte de biomasse;
- le transport de la matière première;
- la production du biocarburant;
- l'utilisation du biocarburant.

Le présent rapport fait simplement une approche de l'empreinte carbone d'un nouveau carburant E20 produit à partir de biomasse (feuilles, branches des arbres). Cela part donc de l'extraction de la biomasse jusqu'à l'utilisation du produit, au profit des bus de la STM. La figure 2.1 présente le scénario intervenant dans l'étude. Le CO<sub>2</sub>, l'eau, la lumière, la végétation urbaine de Rosemont, (etc.), sont les agents intervenant dans la production de la biomasse qui est ensuite récoltée. Cette récolte permet de recueillir les matières premières cellulosiques : (feuilles, branches). Dans le modèle établie, intervient un facteur clé : le transport des matières premières (à l'usine de production). Les moyens de transport utilisés sont alimentés par du carburant fossile (essence). Après la production du bioéthanol, ce dernier est mis sur le marché au profit des bus de la STM (bus se déplaçant dans la localité de Rosemont), l'étude ne tenant pas compte du transport de biocarburant vers la société de transport de Montréal.

D'abord le calcul des émissions de  $\text{CO}_2$  est fait à partir de la combustion d'un litre l'essence et d'un litre bioéthanol : partant des équations chimiques respectives de chaque type de carburant. Puis les résultats serviront à calculer les émissions de  $\text{CO}_2$  des bus de la STM de Rosemont selon les gains de GES, les GES évités par l'utilisation de bioéthanol, les GES émis (transport de la matière première du lieu de récolte à l'usine de production avec du carburant fossile). Le logiciel VENSIM est utilisé pour faire une étude de sensibilité de l'évolution des émissions de  $\text{CO}_2$  selon des simulations faites à partir de scénarios tenant compte de réservoirs à variables principales : atmosphère, biomasse récoltée, utilisation de carburant fossile, utilisation de bioéthanol. Dans le cas de l'étude, la lumière, l'eau, la fabrication des bus, la fabrication des camions de transport de biomasses, la main d'œuvre ne sont pas prises en compte. Les GES dans le présent rapport se rapportent aux émissions ou à la réduction de  $\text{CO}_2$ .

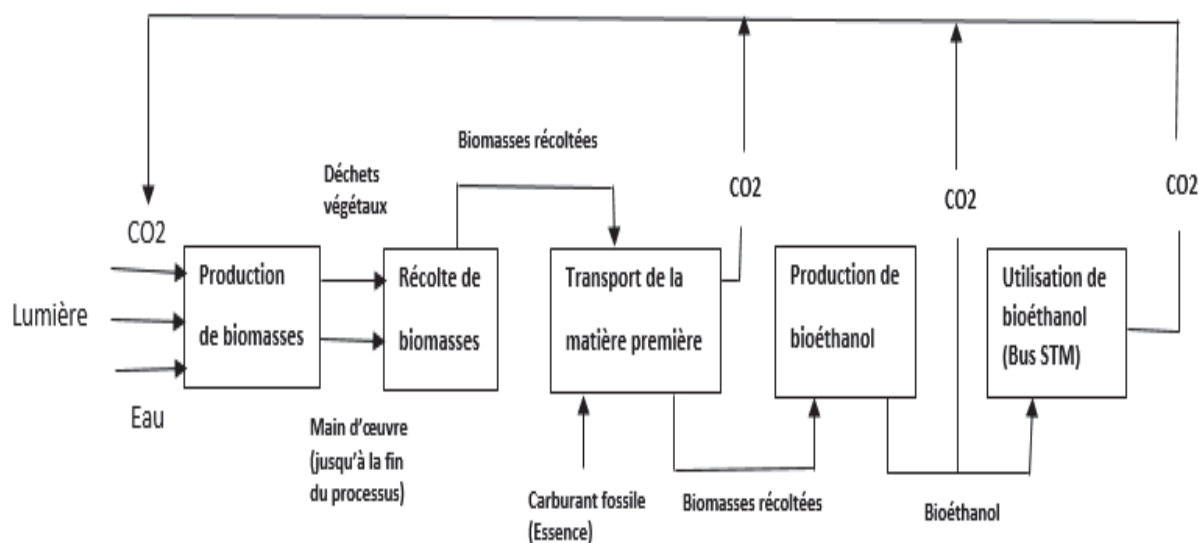


Figure 2.1 Cycle de vie du bioéthanol



## 2.1 Estimation des émissions de CO<sub>2</sub> selon la combustion d'éthanol et d'heptane

Cette section se rapporte à un tableau d'avancement de la combustion, afin de décrire l'état du système chimique au cours de la transformation. En un premier lieu, les équations de réaction de l'heptane et de l'éthanol sont définies, tout en équilibrant les équations avec les coefficients stœchiométriques pour conserver les éléments chimiques et la charge électrique. Ensuite le nombre de mole (X) de chaque élément chimique à l'état initial (avant le commencement de la réaction) est marqué. Puis la quantité de matière en nombre de mole par litre sera déterminé afin d'observer l'évolution des quantités de matière de chaque élément chimique. L'état final marquant la fin de la combustion permet de ressortir le nombre de mole CO<sub>2</sub>. Cependant l'annexe VIII présente les propriétés physique de l'heptane et de l'éthanol, entrant dans la détermination du facteur d'émissions de CO<sub>2</sub> de la combustion du bioéthanol (F<sub>E20</sub>) et du facteur d'émissions de CO<sub>2</sub> de la combustion de l'essence (F<sub>ess</sub>).

$$X = \frac{\sigma}{M} \quad (2.1)$$

Avec :

*X* : quantité de matière en mol/l;

*σ* : densité en g/l;

*M* : masse molaire en g/mol.

## 2.2 Évolution des émissions de CO<sub>2</sub> des bus de la STM de Rosemont

### 2.2.1 Biomasse nécessaire à la production du bioéthanol

Pour évaluer la quantité de biomasse nécessaire à la production de bioéthanol, cette étude estime d'abord le nombre d'arbres existant dans la localité de Rosemont. La quantité des arbres de Rosemont est fonction des données offertes par la banque de données du Québec (Données Québec, 2016). Avec les données de la banque de données du Québec de 2016, le nombre total des arbres de Rosemont dans cette étude équivaut au total des arbres existants

pour chaque type d'espèces (Annexe IV). L'étude de (Belanger, 2012), servira à comparer les données offertes par la base de données du Québec. Belanger (2012), en utilisant le logiciel I-Tree Streets estimait la quantité des arbres de Rosemont en 2011 à 26 493 arbres, soit une prévision d'augmentation de 10 875 arbres sur une période de 5 ans (Belanger, 2012). La quantité totale des arbres de Rosemont en 2016 selon Belanger devrait être le nombre d'arbre total estimé par l'auteur en 2011, plus l'augmentation prévue dans l'espace de 5 ans.

La quantité de biomasses contenue dans les branches, troncs ou écorces des arbres de Rosemont est obtenue grâce au calculateur disponible sur le site (RNCAN, 2016), en entrant le diamètre de l'arbre. Les diamètres des arbres sont entrés selon les diamètres respectifs attribués aux arbres de Rosemont listés dans la base de données du Québec (Annexe IV). Afin de valider les résultats de biomasse du calculateur RNCAN, un autre calcul de biomasse totale sera fait avec l'équation prédictive de calcul de biomasse du module 4 de l'annexe III (module 4 censé être le meilleur selon (Moundounga, 2012)). L'émondage des arbres de Rosemont représenterait l'ensemble de la biomasse utile à être valorisé pour produire du bioéthanol de 2e génération. La formule de détermination de la biomasse à Rosemont est :

$$Q.Be = MtF + (\% E \times MtB) \quad (2.2)$$

Avec :

*Q.Be* : quantité de biomasses totales pour la production de bioéthanol en (t/an);

*MtF* : masse totale des feuilles en (t/an);

*% E* : pourcentage d'émondage;

*MtB* : masse totale des branches t/an.

### **2.2.2 Production du bioéthanol et le pouvoir calorifique : équivalence bioéthanol/carburant fossile**

En considérant que la quantité de biomasses annuelle dépend du pourcentage annuel d'émondage des arbres de Rosemont, le volume de biocarburant dépendra lui aussi de ce

pourcentage. Étant donné que le CRAAQ estime qu'une tonne de biomasses sur la base de matière sèche produirait 230 litres d'éthanol ; le volume de bioéthanol produit est :

$$V. Bé = Q.Be \times 230 \times (1-Th) \quad (2.3)$$

Avec :

*V. Bé* : volume de bioéthanol produit en L/an;

*Th* : taux d'humidité de la biomasse.

Sur le plan réel, la totalité des feuilles et branches des arbres de Rosemont qui tombe par année ne sont pas totalement sèche. Cette situation amène à considérer 3 scénarios (Sc0, Sc1, Sc2). Sc0 représente la production de bioéthanol à partir de la biomasse à 0% d'humidité. Sc1 est la production de bioéthanol à partir de la biomasse à 20% d'humidité. Et Sc2 se définit comme étant la production de bioéthanol à partir de biomasse à 40% d'humidité.

Une considération de facteur d'équivalence entre le bioéthanol et l'essence est prise à l'ordre de 1,56 dans le calcul du volume de bioéthanol équivalent. Cela s'explique et est obtenu à l'exemple de l'étude de Miao et Wu pour l'obtention du biodiésel (Miao et Wu 2006). Dans l'étude de Miao et Wu, l'équivalence du contenu énergétique du bioéthanol est à 64 % du contenu énergétique de biodiesel. En effet, Miao et Wu ont obtenu un biodiesel avec un pouvoir calorifique de 41 MJ/kg, valeur se trouvant dans la gamme du carburant diesel (40-45 MJ/kg). Ce qui n'est pas le cas du bioéthanol qui doit consommer plus de volume pour obtenir les mêmes performances calorifiques (Miao et Wu 2006). Le volume de bioéthanol capable d'être mélangé au carburant fossile dans la présente étude est identifié par l'équation 2.4 :

$$V.Bé eq = V.Bé \times 1,56 \quad (2.4)$$

Avec :

*V. Bé eq* : volume de bioéthanol équivalent en L/an.

### 2.2.3 Évolution des émissions de GES des bus de la STM de Rosemont

Afin de déterminer les gains de la réduction des émissions de GES, l'étude prend en considération les GES émis au moment de la combustion du carburant fossile. La combustion du carburant fossile a lieu lors de la récolte et du transport des résidus (déchets de végétation urbaine et déchets organiques) jusqu'aux usines de production du biocarburant. Cette combustion de carburant fossile est finalement soustraite à la quantité substituée par les biocarburants ou rajouté à la quantité substituée au carburant fossile en mélange au biocarburant, pour obtenir le gain de réduction de GES. Il est à noter qu'étant donné que le volume du bioéthanol dépend du pourcentage annuel d'émondage, il en résulte que la quantité de GES évités lui est également dépendante et par relation logique les gains en GES le sont aussi.

$$G (GES) = GES (Ev) - GES (TRU) \quad (2.5)$$

Avec :

$G (GES)$  : Gains GES en  $tCO_2/an$ ;

$GES (Ev)$  : GES Évités en  $tCO_2 eq/an$ ;

$GES (TRU)$  : GES émis transport récolte-usine.

En s'inspirant des données de base de cette étude et des calculs de biocarburants effectués plus haut, la quantité de GES évités se calcule selon l'équation 2.6 :

$$GES (Ev) = Bc \times (F_{ess} - F_{E20}) \quad (2.6)$$

Avec:

$Bc$  : besoin des bus en carburant fossile en  $L/an$ ;

$F_{ess}$ : facteur d'émissions de  $CO_2$  de la combustion de l'essence en  $t CO_2 eq/L$ ;

$F_{E20}$ : facteur d'émissions de  $CO_2$  de la combustion du E20 en  $t CO_2 eq/L$ .

Le déplacement de la biomasse est pris en compte avec des camions de ramassages de biomasses d'une capacité de 30 tonnes soit un ratio de 48,12 l/100 km, à l'appui du document de (Douvillat et al, 2006) et aussi des recommandations de (RECY-QUEBEC, 2017). La distance parcourue (de la récolte à l'usine) est faite de Rosemont à l'usine de production à travers (Google Map, 2016). Un tracé est d'abord effectué à la main sur Google Map selon le trajet présenté du point de départ (Rosemont) au point d'arrivée (usine Greenfield implantée à Varenne). Ensuite la distance marquée directement par Google Map sur le même trajet, avec une voiture, est relevée pour comparaison au tracé de mesure à la main sur Google Map. L'usine de Greenfield implantée à Varenne est utilisée comme lieu de production du bioéthanol.

$$GES (TRU) = D \times Nc \times Ra \times r_{emis} \quad (2.7)$$

Avec :

*Nc* : nombre total de camions;

*Ra* : ratio de consommation

*D* : Distance parcourue (Aller-Retour Récolte-Usine) en km;

*r (émis)* : émissions de CO<sub>2</sub> en tCO<sub>2</sub>eq/l;

Soit :  $Nc = B(t) \div 30(t)$  et  $D(km) = \text{Aller-Retour Récolte-Usine}$ .

### **2.3 Évolution des émissions de CO<sub>2</sub> selon la consommation en essence, bioéthanol : Simulation avec le logiciel VENSIM**

Cette étape d'étude permet de construire une modélisation des interactions entre les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère selon la consommation en bioéthanol et en énergie fossile. La consommation en carburant fossile part du transport de biomasse vers l'usine de production de bioéthanol. La consommation en bioéthanol quant à elle provient du bioéthanol produit à l'usine de production. L'objectif de la modélisation est donc de réaliser une expérimentation sur un potentiel de réduction d'émissions polluantes. Aussi, cette étape d'étude permet au lecteur de se familiariser avec les possibilités de VENSIM. L'approche avec VENSIM fut de considérer trois à quatre sous-systèmes en fonction du modèle envisagé. Les sous-systèmes considérés sont les suivants :

- ☐ Biomasse produite à partir de la végétation urbaine;
- ☐ Consommation du carburant fossile;
- ☐ Consommation du bioéthanol;
- ☐ CO<sub>2</sub> à partir des émissions dues à la consommation de carburant.

Différentes grandeurs ont été associées à ces sous-systèmes : des taux (tx) de déplacements, de production, d'émissions de CO<sub>2</sub>, de récolte. Ces grandeurs sont spécifiées pour chaque scénario étudié.

### 2.3.1 Familiarisation au logiciel VENSIM

Un réservoir est un “récipient” pouvant accumuler quelque chose (Larousse 2016). Dans cette étape d'étude, cela sera la végétation urbaine de Rosemont qui contient la biomasse (en tonnes) nécessaire à la production de bioéthanol. Mais dans d'autres modèles le réservoir pourrait être un nombre (en personnes), et dans d'autres disciplines, cela pourrait être une somme d'argent, une charge électrique.

- Lancer VENSIM

Le lancement de VENSIM inclue la création d'un nouveau modèle (menu File/New model). Puis dans la fenêtre qui s'ouvre (figure 2.2), paramétrer pour un temps en termes d'année (de 2016 à 2021) avec un pas d'une année. Ayant des données de 2016 sur la quantité d'arbres de Rosemont et une estimation sur la croissance des arbres sur 5 ans selon l'étude de (Belange, 2013), les simulations sont donc projetées sur une période de 5 ans.

**Model Settings**

Time Bounds | Info/Pswd | Sketch | Units Equiv | XLS Files | Ref Modes

Time Boundaries for the Model

INITIAL TIME = 2016

FINAL TIME = 2021

TIME STEP = 1

☒ Save results every TIME STEP

or use SAVEPER =

Units for Time Year

Integration Type Euler

To change later, edit the equations for the above parameters.

NOTE:

OK Cancel

Figure 2.2 Paramétrage du temps

- Créer un réservoir de biomasse

La création du réservoir de biomasse est la sélection “box variable” (sur la page de Vensim préalablement ouverte après avoir validé le choix du temps d’étude), puis cliquer sur la page et taper le nom voulu (Nommée-la biomasse). En cliquant sur le “box variable”, le réservoir de biomasse se colore en noir : il requiert une valeur initiale. Pour la valeur initiale, la biomasse (feuilles, branches) sera issue de la quantité des arbres de Rosemont de la banque de données du Québec de 2016. L’annexe IV offre une quantité de biomasse à 20 873 t, selon le calculateur sur le site (RNCan 2016), c’est-à-dire en considérant un émondage des arbres à 100%. Pour l’instant les variations d’émondages selon l’influence de certains éléments (vents, saisons de l’année,...) sont négligées. Il faut indiquer la valeur initiale de la biomasse (20 873), puis saisir l’unité (t) qui sera mémorisée (figure 2.3).

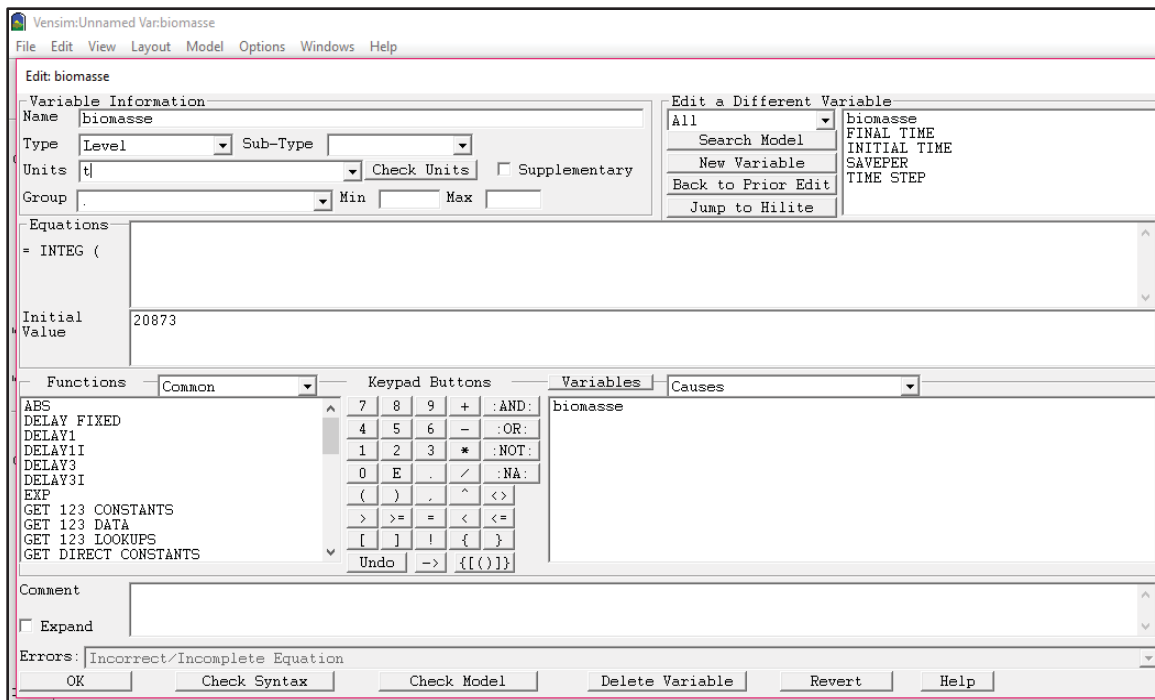


Figure 2.3 Insertion de valeur initiale d'un réservoir

### 2.3.1.1 Création d'un flux de sortie de biomasse

Un réservoir peut être plein ou vide: les humains naissent et meurent, l'argent se gagne et se dépense, la biomasse s'accroît par la croissance de la végétation et disparaît pendant sa récolte. La biomasse récoltée devient une matière première pour divers fins tel que la production de biocarburant. Dans cette étude, le flux qui épuise la biomasse à travers VENSIM est le "transport de biomasse vers usine" (figure 2.4). Le flux de transport de biomasse vers l'usine requiert une équation pour la disparition de la biomasse. La biomasse disparaît par sa récolte, dont le transport est fonction que de la quantité de biomasse de départ. En d'autres termes, la vitesse à laquelle la biomasse se vide n'est pas fixe mais dépend d'un convertisseur : nombres de transports de biomasse. Pour cela un connecteur est mis entre le réservoir de biomasse et son flux de sortie (figure 2.5).



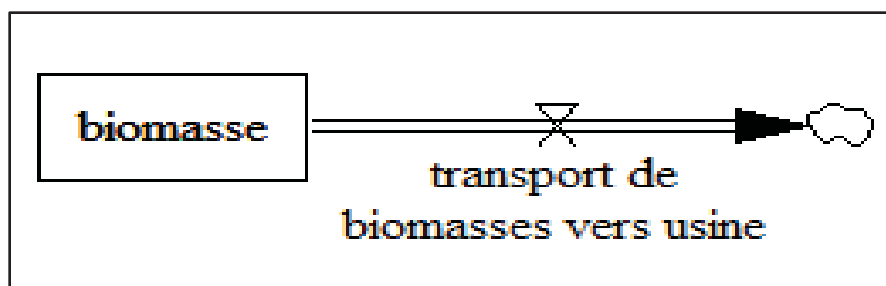


Figure 2.4 Flux de sortie de biomasse

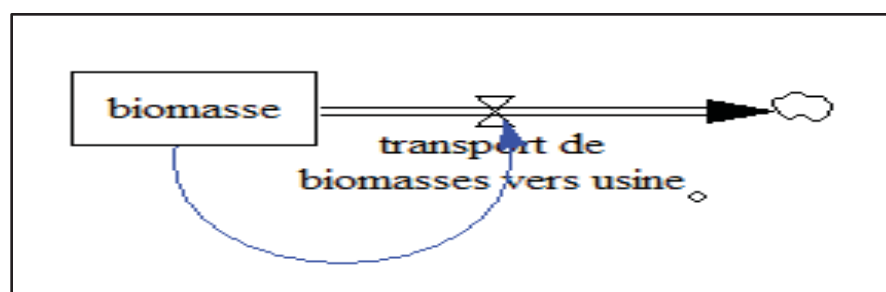


Figure 2.5 Connecteur entre la biomasse et son transport vers l'usine

L'élément "variable" permet d'insérer le convertisseur. Il est disposé à proximité de la vanne de transport de biomasse à l'usine (figure 2.6). Cette variable est nommée : tx de déplacement (ou un autre nom, selon tout un chacun). L'équation représente la valeur (30) et l'unité (t/transport). La valeur est prise à partir de la capacité de ramassage de biomasse à 30 t par déplacement. Le déplacement pour le transport de biomasse est pris en compte avec des camions de ramassages de biomasses d'une capacité de 30 t à l'appui du document de (Douville et al, 2006) et aussi des recommandations de (RECY-QUEBEC, 2017). A chaque déplacement, il disparaît une quantité égale à la quantité du réservoir de biomasse. L'équation associée au déplacement est la relation existante entre les deux variables (biomasse et le taux de déplacement) liées au flux de transport de biomasse vers l'usine (figure 2.7).

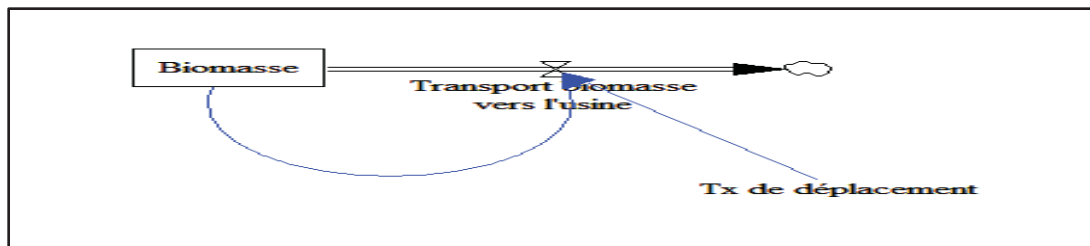


Figure 2.6 Convertisseur de la présence de biomasse selon le transport de biomasse vers l'usine

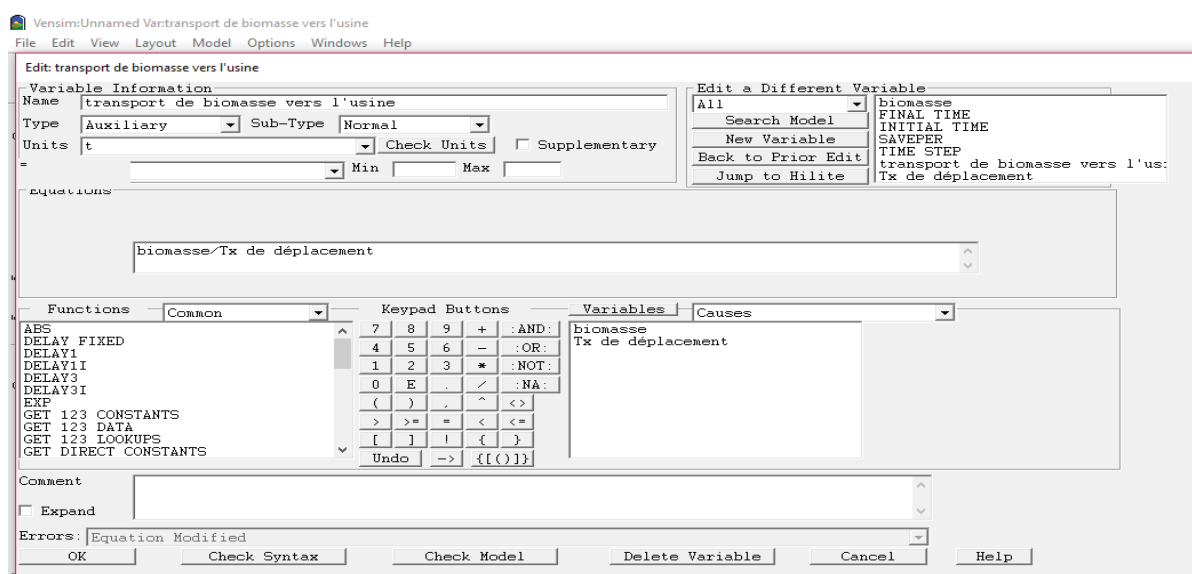


Figure 2.7 Insertion d'équation pour le flux sortant de la biomasse

### 2.3.1.2 Flux d'entrée de biomasse

De la même façon que pour le flux de sortie de la biomasse, un flux d'entrée pour la biomasse est tracé. La présence de biomasse n'est pas constante et dépend de la végétation urbaine. Le réservoir de biomasse est de 20 873 t, soit la quantité de biomasse présente en 2016 pour 38 980 arbres. L'ordre de grandeur du flux entrant est d'environ 2 292 arbres/ans (fonction de la croissance des arbres de 11 460 arbres/5 ans). Cette valeur représente la quantité de végétation urbaine qui devrait s'ajouter chaque année au nombre d'arbres totales (38 980 arbres) existant en 2016 (Annexe IV), comparativement aux prévisions de Belanger. Le nom du flux entrant (figure 2.8) qui correspond à l'augmentation de la végétation et à la

biomasse est : soit 2 292 comme valeur retenue, avec comme unité = t/an. Le réservoir de biomasse est relié à l'équation (figure 2.9) préalablement marquée à la valeur initiale (20 873), mais pas la formule de calcul du stock en fonction du temps. Elle est égale à la différence entre le flux d'entrée et de sortie : saisir la formule, tester la syntaxe puis valider. Au flux entrant intervient un rendement de transfert de 53% (figure 2.9) entre la végétation urbaine et la biomasse. Le rendement équivaut au rapport de la biomasse (20 873 t) sur la quantité totale de la végétation urbaine (38 980 arbres) en 2016.

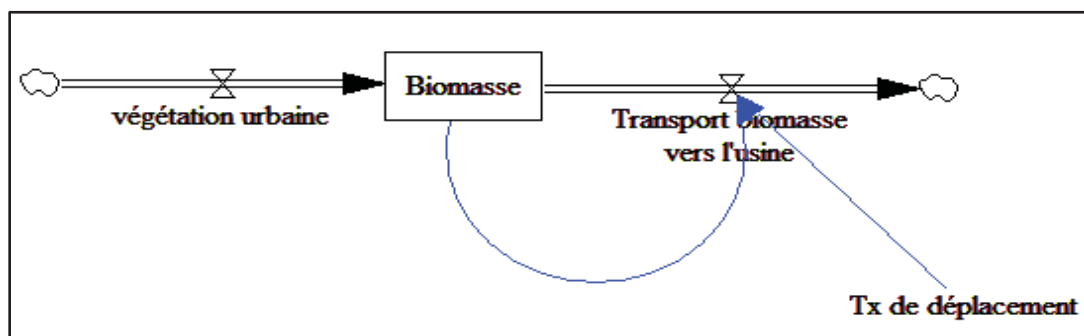


Figure 2.8 Flux d'entrée de la biomasse

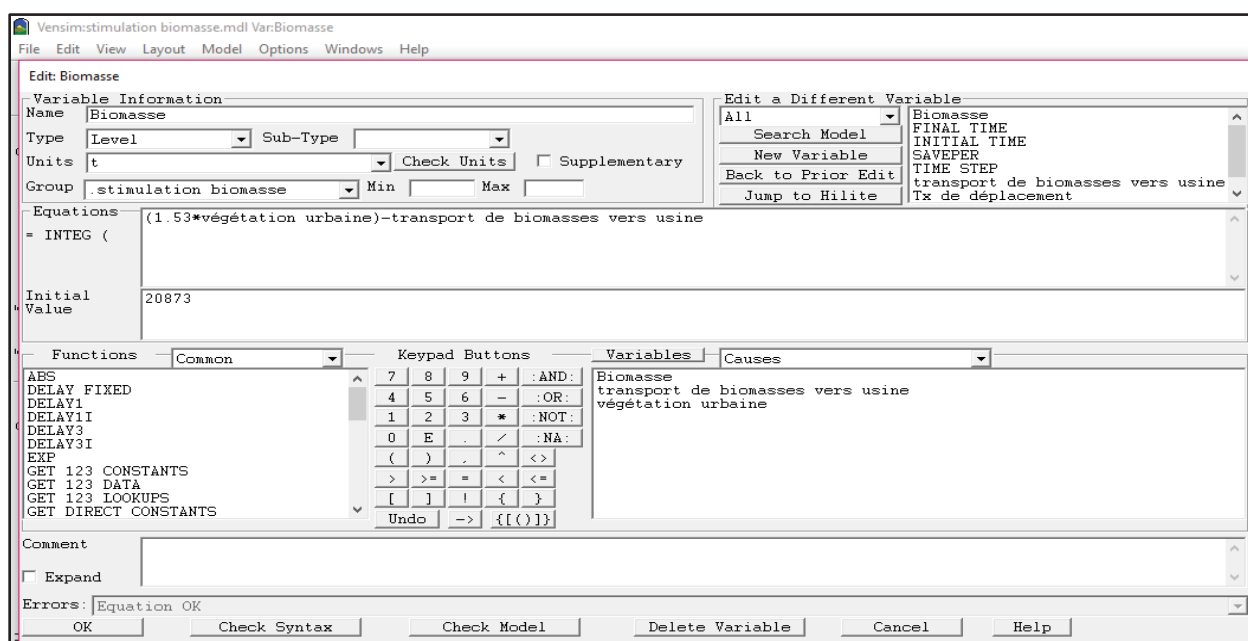


Figure 2.9 Équation pour le réservoir de biomasse

### 2.3.1.3 Lancer la simulation

À ce stade, le modèle est loin d’être achevé, mais néanmoins une observation peut déjà se faire sur le comportement du modèle préétabli. Le modèle permet d’observer le dynamisme existant sur le réservoir de biomasse, selon la végétation urbaine et le transport de biomasse pour chaque année. Il est donc possible de lancer une simulation en cliquant sur “SyntheSim”. Un mini graphe s’incruste sur le réservoir de biomasse. Pour arrêter la simulation il suffit de cliquer sur “stop setup”. Il faut d’abord vérifier que l’équation de transport de biomasse vers l’usine est correcte : avec un apport en végétation urbaine = 0, la quantité de biomasse est sensée diminuer sur chaque année. Ensuite il faut observer l’évolution de la biomasse selon l’évolution de la végétation urbaine en 5 ans (soit 2 292 arbres/an en plus sur chaque année). La simulation doit donner un apport croissant de biomasse chaque année.

## 2.3.2 Emissions de CO<sub>2</sub> selon le type de carburant

### 2.3.2.1 Scenario 1 : Émissions de CO<sub>2</sub> selon le carburant fossile

Ce scénario s’évolution des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du temps (sur une période de 5 ans), selon le flux de matière pour l’utilisation de carburant fossile (figure 2.10). Les émissions de CO<sub>2</sub> trouvent leur origine dans la consommation de carburant fossile des camions de transport de biomasse (figure 2.10). Le tableau 2-1 résume les grandeurs qui ont été associées à chaque sous-système équivalent à un puit de réservoir.

Tableau 2.1 : Grandeurs associés aux sous-systèmes du scénario 1

Sous système	Grandeurs associées
Carburant fossile	Valeur initiale d’essence utilisé = 1 l par 0,00473 tCO <sub>2</sub> émis
	Taux d’utilisation de carburant = 100% selon le transport de la biomasse
CO <sub>2</sub>	Valeur initiale des émissions de CO <sub>2</sub> = 0,00473 tCO <sub>2</sub> par litre de

	carburant
	Taux de CO <sub>2</sub> émis = 100% de la consommation de carburant

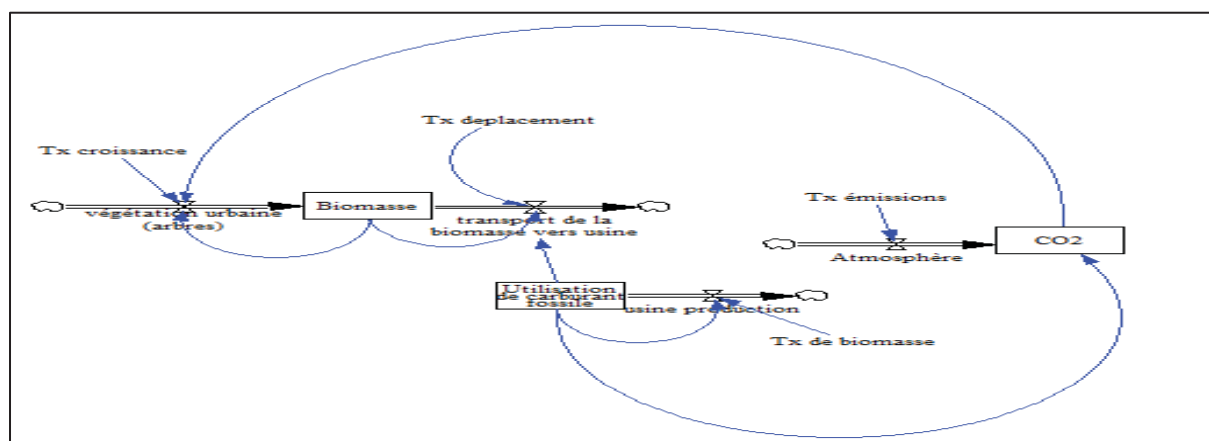


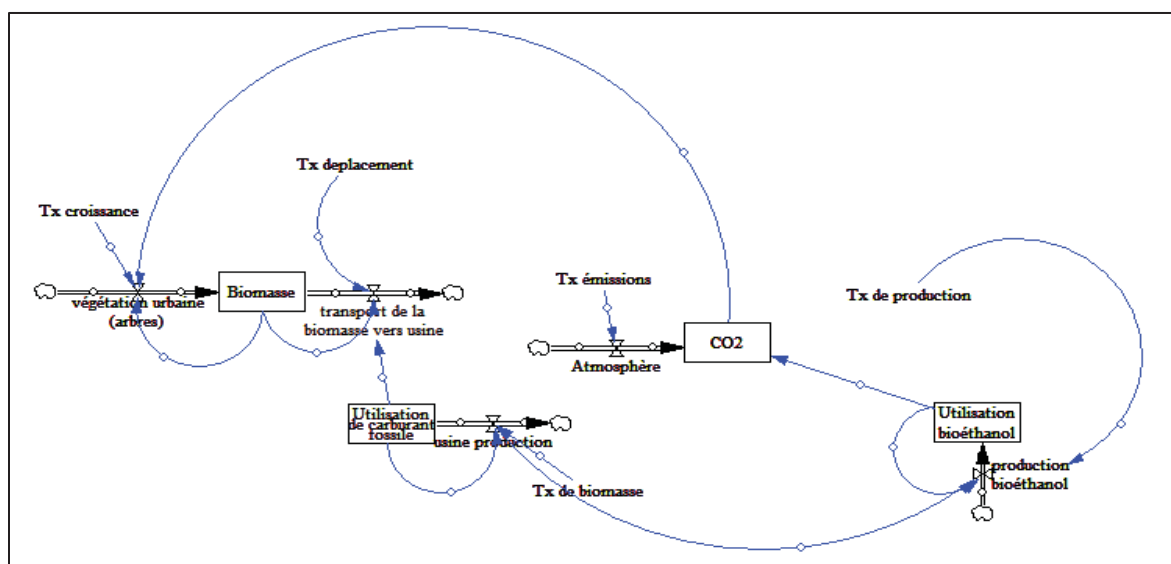
Figure 2.10 Émissions de CO<sub>2</sub> selon la consommation en carburant fossile

### 2.3.2.2 Scenario 2 : Émissions de CO<sub>2</sub> selon bioéthanol

Le scénario 2 consiste à suivre également l'activité des émissions de CO<sub>2</sub> en termes de flux de matières. Un réservoir d'utilisation de bioéthanol s'ajoute au scénario 1, pour en faire le scénario 2. L'utilisation de bioéthanol développe les émissions de CO<sub>2</sub> à partir de fraction issue de CO<sub>2</sub> libéré par le bioéthanol (Figure 2.11 ). L'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère vers la végétation urbaine est fonction du temps, du carburant fossile et du bioéthanol. Le tableau 2-3 résume les grandeurs du sous-système d'utilisation de bioéthanol s'associant aux autres sous-systèmes du scénario 1. Notons que le réservoir biomasse et utilisation de carburant fossile ne sont pas en activités dans le scénario 2.

Tableau 2.2 : Grandeurs associées au sous-système d'utilisation de bioéthanol

Sous système	Grandeurs associées
Utilisation de Bioéthanol	Valeur initiale de bioéthanol utilisé = 1 l par 0,0041 tCO <sub>2</sub> émis  Taux d'utilisation de bioéthanol = 100% du bioéthanol produit

Figure 2.12 : Émissions de CO<sub>2</sub> selon la consommation en bioéthanol

Le but des différents modèles est de suivre l'évolution des réserves de biomasses, de l'activité des émissions de CO<sub>2</sub> avec et sans consommation de carburant fossile ou de bioéthanol. Cela se traduit par l'évolution de flux de matière en fonction du temps. Les différents modèles sont respectivement le scénario se basant uniquement sur le réservoir de biomasse, le scénario 1, le scénario 2.

## CHAPITRE 3

### RESULTATS

#### 3.1 Émissions de CO<sub>2</sub> selon la combustion d'un litre de chaque type carburant

Partant de la réaction chimique de l'heptane (équation 2.1), cette réaction produirait environ 4817 kJ/mol (Annexe VIII) dont 43% (rendement fixe dans l'étude) seront utilisées sous forme d'énergie mécanique. Le rendement définit est un choix arbitraire par rapport au cycle de Carnot préconisant un rendement de Carnot des moteurs thermiques à 50% (cas, idéal mais ne pouvant pas être atteint dans la réalité). L'énergie motrice utilisable est donc d'environ 2 071 kJ. Le nombre de moles de l'heptane représente environ 6,78 moles. Ce qui signifie qu'un litre d'essence renferme 6,78 mole d'heptane. Alors un litre d'essence produit 14 043 kJ. Ainsi le tableau 3.6 permet d'observer l'avancement la combustion complète d'heptane ressortant des émissions de 47,39 moles de CO<sub>2</sub> pour un litre d'essence. Les pertes occasionnées

Pendant ce temps, la réaction chimique du bioéthanol ( $C_2H_6O + 6 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 3 H_2O$ ) à 20% E20 et 80% d'essence produit environ 1 368 kJ/mol (Annexe VIII). Ici, les pertes ne sont pas pris en compte pour le bioéthanol parce qu'un mélange est utilisé, seul les pertes de l'énergie fossile sont considérées. Étant donné que le nombre de moles d'éthanol est de 17,13 mol/l, alors ce litre produira environ 23 434 kJ. Mais seulement 20% de cette production sera prise et 80% de celle de l'essence pour former le E20. Cela correspond au total pour le mélange à environ 15 922 kJ (4 687 kJ de bioéthanol et 11 235 kJ d'essence). Le tableau 3.7 montre cependant l'avancement d'une combustion complète d'éthanol avec des émissions à 34,26 moles CO<sub>2</sub>.

Il est plus judicieux de raisonner en termes de masse CO<sub>2</sub>, qui est une unité standard des émissions de GES. Pour ce faire, il faut multiplier les valeurs moles CO<sub>2</sub> calculé ci-dessus par la masse molaire de chaque composant chimique. Ce qui donne respectivement les émissions d'un litre de carburant (représentant les unités fonctionnelles pour la suite de l'étude):

- Émission C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> = 4 739 gCO<sub>2</sub>;

- Émission  $C_2H_6O = 1\,576 \text{ gCO}_2$ ;
- Émission  $E20 = 4\,106,4 \text{ gCO}_2$  ( $80\% \text{ Émission } C_7H_{16} + 20\% \text{ Émission } C_2H_6O$ ).

Il en revient donc que les émissions de GES évitées par la consommation de E20 est d'environ  $633 \text{ gCO}_2$  ( $0,00063 \text{ tCO}_2$ ). Selon les résultats, on peut affirmer que le combustible E20 produit plus d'énergie ( $15\,922 \text{ kJ/l}$ ) que l'essence pure ( $14\,043 \text{ kJ/l}$ ). C'est-à-dire que pour un même travail donné, l'effort en termes d'utilisation de E20 sera moindre que l'utilisation de l'heptane. Sur le plan environnemental, la combustion avec le carburant E20 ( $4\,106 \text{ gCO}_2$ ) émet moins de  $CO_2$  que l'essence ( $4\,739 \text{ gCO}_2$ ). Cela se justifie par le coefficient stœchiométrique de la réaction de combustion (référence équation 2.2).

Tableau 3.1 Avancement d'une combustion complète d'heptane

Équation chimique		$C_7H_{16} + 11 O_2 \rightarrow 7 CO_2 + 8 H_2O$			
État du système	Avancement en mole	n $C_7H_{16}$	n $O_2$	n $CO_2$	n $H_2O$
État initial	0	6,78	74,51	0	0
État intermédiaire	X	$6,78 - X$	$74,51 - 11X$	7X	8X
État final	$X_{\max} = 6,77$	0	0	47,39	54,16

Soit :

- quantité molaire = n;
- degré d'avancement de l'équation = X;
- état final quand toute la transformation a eu lieu =  $X_{\max} = X$  (provenant des équations :  $6,78 - X = 0$  ;  $74,51 - 11X = 0$ ).

Tableau 3.2 Avancement d'une combustion complète d'éthanol

Équation chimique		$C_2H_6O + 3 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 3 H_2O$			
État du système	Avancement en mole	n $C_2H_6O$	n $O_2$	n $CO_2$	n $H_2O$
État initial	0	17,13	51,39	0	0
État intermédiaire	X	$17,13 - X$	$51,39 - 3X$	2X	3X
État final	$X_{\max} = 17,13$	0	0	34,26	51,39



Soit :

- quantité molaire =  $n$ ;
- degré d'avancement de l'équation =  $X$ ;
- état final quand toute la transformation a eu lieu =  $X_{\max} = X$  (provenant des équations :  $17,13 - X = 0$  ;  $51,39 - 3X = 0$ ).

### 3.2 Réduction de CO<sub>2</sub> des bus de la STM de Rosemont avec du E20

Le besoin annuel en carburant fossile des bus de la STM passant par Rosemont est d'environ 1 126 000 L (tableau 3.3). Ce qui représente un besoin en bioéthanol d'environ 225 200 L (tableau 3.3). Les besoins en carburants sont fonction d'une distance de parcours de 1 731 637 Km (tableau 3.3). Pour obtenir la distance de parcours totale, la distance de parcours en un passage est d'abord estimée selon l'annexe VI. Le nombre de passage des bus de la STM à Rosemont en 2016 est la somme du nombre de passage par saison (obtenu à partir d'une demande faite auprès du service d'accès à l'information de la STM) (Annexe VII).

Le nombre d'arbres (toutes espèces confondues) de Rosemont selon la banque des données du Québec à l'année 2016 est de 38 980 arbres (Annexe IV), contre 37 368 arbres selon les prévisions de l'étude de Belanger. Une différence d'environ 1 612 arbres est remarquée, soit un pourcentage d'erreur d'environ 4%. Cette différence pourrait se justifier par le fait que Belanger utilise le logiciel I-Tree Streets qui est un logiciel adapté plus aux conditions américaines. Pour la suite de l'étude, le total des arbres (toutes espèces confondue) de la base de données du Québec est utilisé.

Tableau 3.3 Besoin en carburant des bus passant par Rosemont

Année	Distance parcourue (km) en un passage (Annexe VI)	Nombres de passages/an = $\sum$ des passages de toutes les saisons (Annexe VII)	Distance parcourue (km/an) = Distance parcourue en un passage $\times$ Nombres de passages/an	Besoin en carburant fossile (l/an)	Besoin en E20 (l/an) = $0,2 \times$ Besoin en carburant fossile
2016	114,64	15 105	1 731 637	1 125 564	225 100

Le tableau 3.4 fait remarquer une différence d'environ 202 t pour la biomasse des feuilles, et une différence de 608 t pour la biomasse des branches selon l'utilisation du calculateur RNCAN (Annexe IV) et l'application de l'équation allométrique du module 4 de l'annexe V. Ces différences ont un pourcentage d'erreur d'environ 8% pour la biomasse des feuilles, et environ 3% pour la biomasse des branches. Ces différences pourraient se justifier sur le fait que le module de base intégré au calculateur de RNCAN est différent de celle du module 4; le module 4 établissant son équation que sur un types d'espèces et le module de base du calculateur de RNCAN sur plusieurs espèces confondus.

La quantité totale des feuilles et branches retenue pour la suite de l'étude est celle des calculateurs de RNCAN, à l'ordre de 2644 tonnes/an pour les feuilles et de 18 229 tonnes/an pour les branches. Ces résultats donnent lieu à une équation du type :

$$Q.Be (t/an) = (18\,229 \times \% E) + 2644 \quad (3.1)$$

Tableau 3.4 Comparaison des récoltes de biomasse

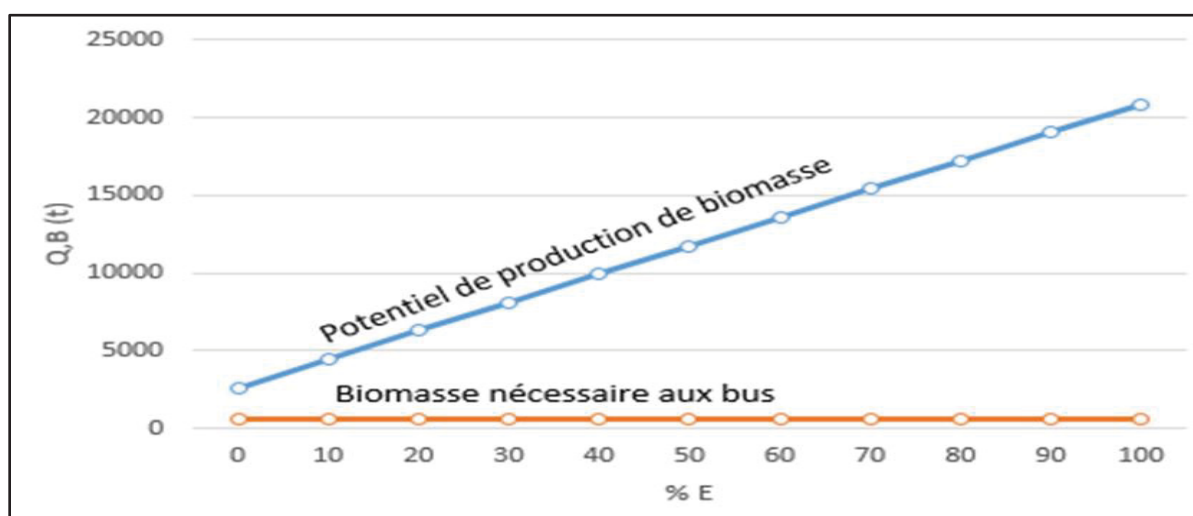
Biomasse totale	Feuilles (t/an)	Branches (t/an)	Variations de récolte des feuilles = B.c -B.m4	Variation de récolte des branches = B.c – B.m4
Biomasse selon calculateur de RNCAN (B.c)	2 644	18 229	202	608
Biomasse selon le modèle 4 d'équation de l'annexe (B.m4)	2 442	17 621		

L'équation 3.1 permet d'obtenir la quantité de biomasses à Rosemont. La quantité de biomasses est représentée dans le tableau 3.5 et le graphique 3.1. Elle est calculée à partir des données présentes en annexe IV et considérant une utilisation des branches d'émondages de 0 % à 100 %. C'est-à-dire que les branches d'arbres ayant subi un émondage sont utilisées selon la quantité désirée (une quantité allant jusqu'à 100 % qui est la quantité totale des branches d'arbres émondées), ou pas (0 %). La quantité d'émondage représente la chute des branches des arbres comme définis dans le Larousse (Larousse 2016). Au fur et à mesure que le pourcentage d'émondage augmente, la quantité de biomasses à récolter l'est aussi. Ce qui

explique l'allure croissante d'une courbe au graphique 3.1. Une allure stable d'une seconde courbe selon le besoin des bus de la STM est représentée au graphique 3.1, soit un besoin d'environ 627,4 t de biomasse. Ce besoin peut donc être satisfait uniquement à travers les feuilles des arbres tout en estimant pour la suite de l'étude que le besoin des bus reste constant.

Tableau 3.5 Quantité de biomasse selon l'émondage

% d'émondage annuel (% E)	Masse des branches (t/an)	Biomasse totale (t/an)
0	0	2 644
10	1 823	4 467
20	3 646	6 290
30	5 469	8 113
40	7 292	9 936
50	9 115	11 759
60	10 937	13 581
70	12 760	15 404
80	14 583	17 227
90	16 406	19 050
100	18 229	20 873



Graphique 3.1 Évolution de la quantité de biomasses en fonction du taux d'émondage

Ainsi, la récolte de biomasse offre une production en volume de bioéthanol équivalent, listé dans le tableau 3.6. Les volumes équivalents sont obtenus à partir du pourcentage d'émondage annuel des arbres de Rosemont. Pour donc répondre aux besoins des bus de la STM, la biomasse (essentiellement les feuilles) des arbres suffit pour alimenter les besoins en bioéthanol même en tenant compte du taux d'humidité (tableau 3.6). En regardant le facteur de production sur la consommation, les différents scénarios ont pour facteur  $Sc_0 = 4,21$ ,  $Sc_1 = 3,37$  et  $Sc_2 = 2,53$ . Les différents facteurs sont tous supérieurs à 1 alors le système est considéré durable. Mais la durabilité du système baisse lorsque le taux d'humidité de la biomasse (essentiellement les feuilles) augmente. Il est donc nécessaire en matière de durabilité d'utiliser de la biomasse sèche pour produire le bioéthanol.

Il est aussi intéressant de faire mention de la durabilité de la ressource dans le but de savoir si la biomasse serait disponible pour satisfaire à long terme les besoins en bioéthanol. Pour ce faire, un facteur de durabilité en nombre d'année ( $Fd$ ) peut être défini de la manière suivante :

$$Fd = [V.Bé eq]_i \div V.Bé eq \times DV \quad (3.2)$$

Avec

- $i = \{SC_0, SC_1 \text{ et } SC_2\}$
- $DV = \text{durée de vie des arbres partant d'une hypothèse de 50 ans}$

En considérant les scénarios  $SC_0$ ,  $SC_1$  et  $SC_2$  les facteurs de durabilité sans émondage sont respectivement égaux à 210 ans, 168 ans et 126 ans. Ces valeurs sont valables si les besoins de bioéthanol restent constants. Cela montre de façon subjective le degré de renouvellement du bioéthanol en cas d'utilisation par la société STM comme mélange avec l'essence.

Pour une biomasse de 627,4 t (essentiellement les feuilles), les bus parviendraient à satisfaire leurs besoins en bioéthanol de 225 200 l tout en réduisant les émissions de  $CO_2$  d'environ 709 t $CO_2$ , contrairement à 1 126 000 l d'essence émettant 5 326 t $CO_2$ . En transportant la biomasse, les émissions de  $CO_2$  sont d'environ 1,4 t $CO_2$ /an. Cette valeur est négligeable,

soit 0,026% des émissions de CO<sub>2</sub> initiale des bus de la STM consommant que de l'essence. L'empreinte carbone de E20 est inférieur à celle de l'essence d'où il est possible d'affirmer que l'utilisation de E20 pourrait réduire les émissions de GES de 13,3%.

Tableau 3.6 Volume de bioéthanol équivalent en fonction de l'émondage

% d'Émondage	Sc0 (l/an)	Sc1(20% d'humidité) (l/an)	Sc2(40% d'humidité) (l/an)
0	948700	758900	569200
10	1603000	1282000	961600
20	2257000	1805000	1354000
30	2911000	2329000	1746000
40	3565000	2852000	2139000
50	4219000	3375000	2531000
60	4873000	3898000	2923000
70	5527000	4421000	3316000
80	6181000	4945000	3708000
90	6835000	5468000	4101000
100	7489000	5991000	4493000

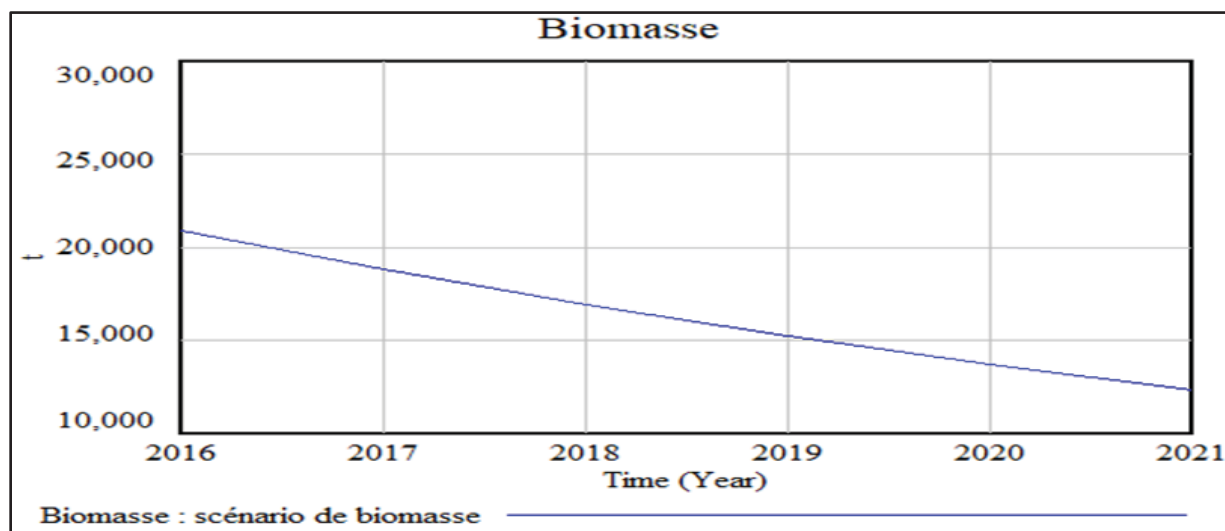
### 3.3 Évolution des émissions de GES selon l'utilisation de bioéthanol

#### 3.3.1 Simulation du réservoir de biomasse

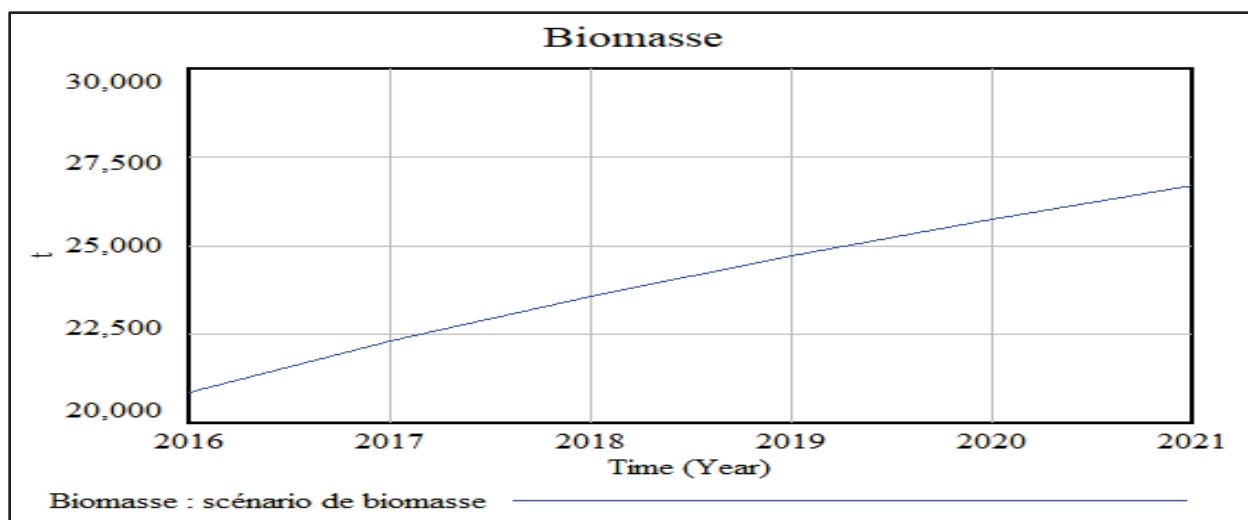
Selon le principe méthodologique de création de réservoir de biomasse à partir de VENSIM, la simulation permet de confirmer l'équation de base du transport de biomasse; d'où l'allure décroissante sur chaque année, de la courbe du graphique 3.3. Cette décroissance est due au fait que la valeur initiale de la végétation urbaine est fixé à 0 pour une quantité de biomasse

initialement à 20 873 t. La quantité de biomasse diminue d'environ 40% en 5 ans. Autrement dit, la quantité de biomasse en 2016 serait capable d'être transportée et valorisée sur une période de 5 ans en n'épuisant que 40% du réservoir de biomasse. Il faudrait donc 7 ans et demi en plus, pour épuiser les 60% restant du réservoir de biomasse. L'épuisement complet du réservoir de biomasse se ferait donc en 12 ans et demi.

Cependant, si la végétation urbaine augmentait de 11 460 arbres en 5 ans, elle ferait croître chaque année la quantité de biomasse initiale (20 873 t). En témoigne l'allure croissante de la courbe du graphique 3.4. La courbe croît jusqu'à atteindre un maximum d'environ 27 000 t de biomasse en 2021; soit une augmentation d'environ 29 % de biomasse à Rosemont. Contrairement à la végétation urbaine à 0 (après une récolte de biomasse l'année précédente), la végétation urbaine augmentant de 11 460 arbres chaque 5 ans montre qu'il ne serait jamais possible d'épuiser le réservoir de biomasse au profit de sa mise en valeur. Car la végétation urbaine représenterait ici une mine-futur inépuisable offrant un réservoir de biomasse inépuisable (malgré sa mise en valeur), si le rythme de croissance de la végétation urbaine est maintenue ou croît encore plus que sa valeur initiale.



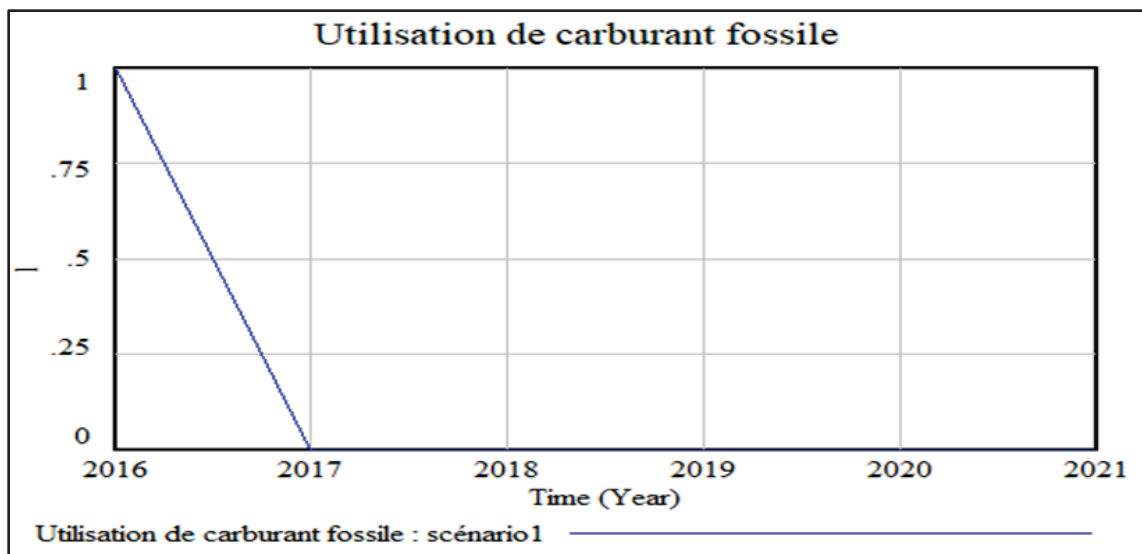
Graphique 3.3 Évolution du réservoir de biomasse sans la végétation



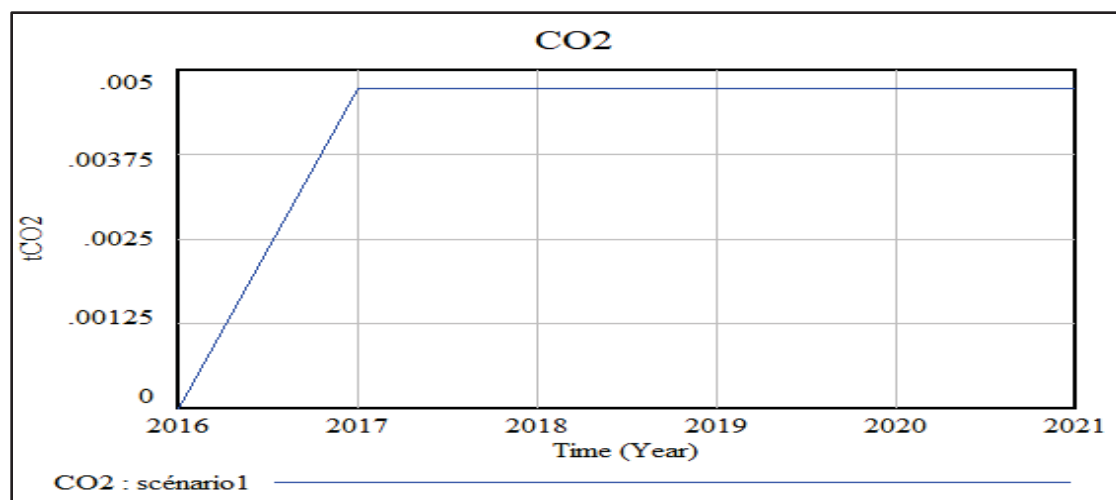
Graphique 3.4 Évolution du stock de biomasse a végétation croissante

### 3.3.2 Scenario 1 : Exploitation de biomasses, consommation d'énergie fossile

Le scénario 1 est un scénario partant d'un réservoir de biomasse. À ce réservoir sont rajoutés un réservoir de consommation de carburant fossile et un réservoir d'émission de CO<sub>2</sub>. Le scénario 1 part sur la base que le réservoir de biomasse est : une source inépuisable pour une végétation qui croit logiquement environ 29 % en plus de sa valeur initiale chaque 5 ans, tout en faisant de la biomasse une mine-futur également. Le graphique 3.5 présentant une allure décroissante en 2016 se justifierait par le fait qu'une unique récolte de biomasse se fait sur cette année. Et l'allure stable de la courbe à valeur nulle, confirmerait le manque d'activité de transport de biomasse durant 2017 à 2021. Aussi, il apparait à travers le graphique 3.5 et le graphique 3.6 obtenus, que l'activité d'émissions de CO<sub>2</sub> en termes de flux de matières et le réservoir de carburant fossile sont directement liées. En effet au fur et à mesure que l'utilisation du carburant fossile ait lieu en 2016, l'activité d'émissions de CO<sub>2</sub> croit jusqu'à atteindre un maximum en fin d'année 2016. Lorsque l'activité de consommation de carburant fossile prend fin, elle stabilise les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Ainsi pour chaque litre de carburant fossile consommé, environ 0,004 tCO<sub>2</sub> sont émis.



Graphique 3.5 Évolution de l'utilisation du carburant fossile



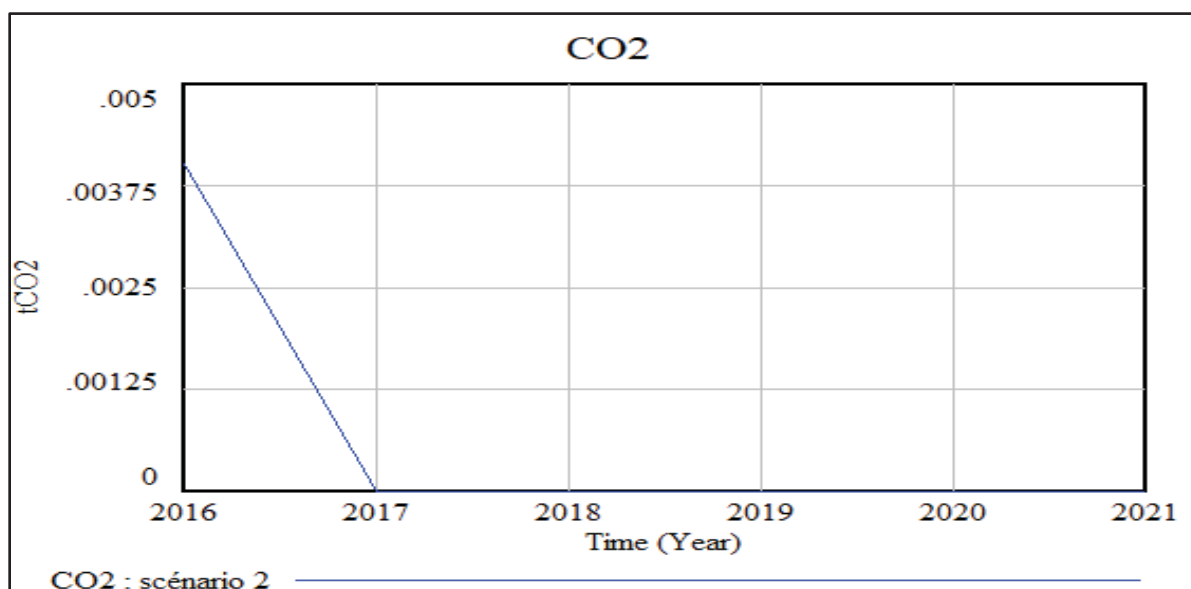
Graphique 3.6 Évolution des émissions de CO2

### 3.3.3 Scenario 2 : Consommation bioéthanol

Le scénario 2 est une continuité du scénario 1, mais à elle s'ajoute un réservoir de consommation du bioéthanol, tout en se disant que l'activité de biomasse et de son transport n'est plus actif (donc pas de consommation d'essence). L'activité de consommation de bioéthanol est identique pour chaque année selon un même besoin. Le bioéthanol utilisé dans



ce cas est à 100%. Dans ce cas, il faut tenir compte de la modification des moteurs pour leur permettre de contenir uniquement du bioéthanol. Le bioéthanol parviendrait donc à réduire complètement les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'air : en témoigne l'allure décroissante de la courbe du graphique 3.7. Cette courbe décroît jusqu'à atteindre la valeur nulle d'émissions de CO<sub>2</sub>. Si le rythme de consommation de bioéthanol se maintient sur chaque année en lieu et place d'une consommation de carburant fossile, les émissions de CO<sub>2</sub> seront toujours évitées : d'où l'allure stable à 0 de la courbe du graphique 3.7. Ce qui s'explique par le fait que la végétation urbaine pendant la photosynthèse, a réabsorbé la quantité de CO<sub>2</sub> émise lors de la combustion du bioéthanol.



Graphique 3.7 Évolution des émissions de CO<sub>2</sub> selon la consommation de bioéthanol



## **CHAPITRE 4**

### **DISCUSSION**

Les résultats laissent apparaître que les déchets végétaux urbains sont une mine-futur pour la production de bioéthanol. Le stock de biomasse disponible (sans émondage) produirait une quantité suffisante de bioéthanol pour assurer les besoins de combustible dans les bus (mélange 20% d'éthanol et 80% d'essence). Ainsi, un besoin en bioéthanol serait une issue de valorisation des déchets végétaux. Le bioéthanol est donc un carburant viable de par le fait que la ressource de matière première est une ressource inépuisable. Le domaine du transport pourrait cependant profiter de l'abondance des déchets végétaux pour satisfaire son besoin en carburant et en même temps réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. La consommation de bioéthanol est une source de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Ainsi, les bus de la STM circulant à Rosemont dans la présente étude, en consommant du biocarburant E20 d'énergie fossile, réduit de 13,3% les émissions de CO<sub>2</sub> comparativement aux bus qui consomment uniquement de l'essence.

La quantité de biomasses estimée dans l'étude est variable selon l'émondage. Ainsi, le rendement en bioéthanol étant seulement spécifique à la biomasse doit être évalué selon un temps donné de récolte de biomasses. Le facteur de durabilité devient un aspect important du potentiel de production de bioéthanol. Les émissions liées au transport de matières premières sont négligeable grâce à la proximité de la zone de récolte de biomasse et de l'usine de production. L'étude de sensibilité de la consommation de bioéthanol avec le logiciel VENSIM qui est réalisée en admettant uniquement une utilisation globale de bioéthanol (100% en volume) confirme que l'utilisation de bioéthanol réduit les émissions de CO<sub>2</sub> et parviendrait également les supprimer. Ce qui s'explique par le fait que les émissions de CO<sub>2</sub> dû à la consommation de E100 sont absorbées par les arbres pendant leur photosynthèse. L'étude de sensibilité est une comparaison des premiers calculs établis sur la base de consommation de 20% de bioéthanol, mais en visant une consommation de 100% de bioéthanol pour plus de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Au vue de la revue de littérature précédemment faite, il en ressort des études se tournant dans la même logique que la présente étude. En 2012, Belanger parvient à faire une estimation de la végétation urbaine de Rosemont tout en prévoyant un potentiel de croissance de cette végétation sur les 5 prochaines années. Mais comparativement à la présente étude, il en ressort une différence d'environ 4%. En effet, cela s'explique que les résultats de Belanger sont des estimations adaptées aux conditions américaines, tandis que cette étude se repose directement sur une base de données québécoise de l'arrondissement de Rosemont. L'un ou l'autre, cette possibilité de croissance de la végétation urbaine conduit à une idée de valorisation. La valorisation des déchets de la végétation urbaine a débuté avec l'enfouissement, donnant naissance par la suite à des programmes tels que le projet montréalais sur la production de biocarburants avec des déchets (Pinard, 2011). Il est généralement admis que l'utilisation de biocarburant réduit les émissions de GES (Gagant, 2006). Une étude du projet de l'éthanol cellulosique varenne au Québec (PECV) en 2012 ressort qu'une production de 38 millions de litres bioéthanol de 2e génération, serait capable de réduire 110 000 tCO<sub>2</sub> (J. Hebert, 2013; Enerken, 2010). Au début des années 2000, trois projets (Biobus, Biopêche et Biomer) de démonstration de l'utilisation de biocarburants ont été réalisés au Québec (Gagnant, 2006). Le projet Biobus a permis à 155 autobus de la STM de rouler au biocarburant en réduisant de 1400 tCO<sub>2</sub> (Gagnant, 2006).

Loin d'être une étude de faisabilité complète des émissions de CO<sub>2</sub>, cette étude se veut être un premier élément de réflexion de l'impact des biocarburants sur les émissions de GES. En effet plusieurs facteurs influencent les émissions de CO<sub>2</sub> : la production de biocarburant, les technologies de mesures adaptées, les ressources humaines, les besoins de la communauté, les retombées socioéconomiques et environnementales, sans oublier la volonté politique. Cette étude n'a pas la prétention de porter une analyse sur tous ces aspects techniques, socio-économiques et même politiques. Les résultats obtenus dans la présente étude restent des estimations théoriques sur l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> par l'utilisation du bioéthanol et du carburant fossile (essence).

Les paramètres pouvant remettre en question ce résultat sont : les hypothèses, la population stable, la distance parcourue stable, la disponibilité de la biomasse stable. Par exemple, nous

faisons l'hypothèse d'un pourcentage d'utilisation du transport en autobus constant et une population constante. L'augmentation du pourcentage de transport en autobus à Rosemont ou encore la croissance de la population de Rosemont va jouer sur ses besoins en déplacement avec les bus. Cela pourrait créer une augmentation de la consommation des bus et ainsi influencer la réduction de gaz à effet de serre prédit dans la zone d'étude.

Une des limitations de l'étude est l'absence d'une unité fonctionnelle reconnue dans le domaine du déplacement urbain. Par exemple, les résultats de l'étude pourraient être ramenés en unité fonctionnelle par habitant ou par 100 km parcourue par les bus de la STM. Cela faciliterait la comparaison entre les études effectuées dans d'autres agglomérations ou la comparaison avec d'autres mesures de réduction du CO<sub>2</sub>.

Une hypothèse majeure de cette étude est la disponibilité stable de la biomasse. Cette disponibilité stable de biomasse quant à elle est influencée par les limites selon l'utilisation de la biomasse. C'est-à-dire que le biocarburant produit n'est renouvelable et durable que s'il n'y a pas :

- de surexploitation de la ressource;
- de mises en péril de la fertilité des milieux qui la produisent;
- d'impacts excessifs sur la biodiversité;
- de compétitions excèsives pour l'utilisation de la biomasse.

Dans le cas du milieu urbain de Rosemont, la biomasse est déjà ramassée et utilisée à d'autres fins par la ville de Montréal. Notre étude ne s'est pas intéressée à ce que la ville de Montréal fait actuellement de cette biomasse. Dans une optique de compétition pour la ressource, il serait pertinent de se demander si l'usage actuel de la biomasse par la ville de Montréal est plus bénéfique pour l'environnement qu'une utilisation potentiel pour fabriquer du biocarburant. Par exemple, une partie de la biomasse est nécessaire pour enrichir le sol et ainsi permettre la croissance des arbres. La création de compost à partir de la biomasse permet d'éviter l'appauvrissement des sols et le maintien d'une flore urbaine si le compost retourne dans l'arrondissement de Rosemont. Comparer les impacts des usages potentiels de la biomasse sur l'environnement n'est pas simple et dépend fortement des priorités. Cela dépasse le cadre de cette étude.

En prenant en compte plus d'usages possibles de la biomasse, le logiciel Vensim deviendrait alors plus pertinent. Le principe proie-prédateur pourrait être ramené aux arbres (en tenant compte de la durée de vie, du taux de croissance : fonction de l'engrais, du phosphore, du CO<sub>2</sub>...) à la ressource, et à la population. La biomasse reste cependant renouvelable si le principe de compétition sur la ressource est pris en compte. Ainsi l'usage de la ressource renouvelable limitera la consommation de la ressource renouvelable. Le logiciel Vensim pourrait permettre de prendre en compte non seulement l'usage de la biomasse, mais aussi l'effet de cet usage sur la production de la biomasse. La rétroaction sur le milieu causée par le choix de l'usage de la biomasse doit être pris en compte dans le logiciel pour éviter les résultats linéaires observés dans cette étude.

Pour réaliser un projet de manière durable, il est important de tenir compte des trois aspects du développement durable qui sont les aspects environnementaux, économiques et sociaux. L'aspect environnemental est l'unique aspect qui a été pris en compte dans ce rapport. Cela rend cette étude non complète dans la définition du concept de développement durable. En effet, une étude de coût ainsi qu'une étude d'impact sur la qualité de vie de la population pourraient compléter cette étude et aboutir à une solution plus durable. Néanmoins ce rapport se veut être un tremplin, un plus à la communauté scientifique, en termes d'estimations théoriques de l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> par l'utilisation du bioéthanol et du carburant fossile. C'est aussi l'une des rares études portant sur le potentiel de production de bioéthanol, de réduction de CO<sub>2</sub> des bus de la STM de l'arrondissement de Rosemont.

## CONCLUSION

Le présent rapport a porté sur un problème de pollution atmosphérique. Ainsi la question qui y ressort est de savoir si le biocarburant est capable de remplacer l'énergie fossile tout en étant viable à long terme pour préserver l'atmosphère des émissions de GES. L'objectif général de cette étude consiste à déterminer les émissions directes de GES de l'utilisation du biocarburant E20 dans les bus de la STM à Rosemont.

Ainsi l'étude a permis de constater que les biocarburants, précisément le bioéthanol parvient à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans le transport. Ce qui implique une considération de la récolte de biomasse dans le processus de production de bioéthanol. La quantité de biomasse récoltée joue sur le potentiel de production de bioéthanol, entraînant ainsi la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Nous notons que l'utilisation du E20 (20% d'E20 et 80% d'énergie fossile) dans les bus de la STM à Rosemont, baisse les émissions de CO<sub>2</sub> de 13,3% par rapport à des bus qui utiliserait uniquement de l'essence sur une année. Les émissions dues au transport de la biomasse sont négligeables (soit 0,026% des émissions de CO<sub>2</sub> initiale des bus de la STM consommant que de l'essence). L'étude de sensibilité avec le logiciel VENSIM réalisée (admettant uniquement une utilisation globale de bioéthanol à 100% en volume) confirme que l'utilisation de bioéthanol réduit les émissions de CO<sub>2</sub> mais parviendrait également les supprimer. Ce qui s'explique par le fait que les émissions de CO<sub>2</sub> dû à la consommation de E100 sont absorbées par les arbres pendant leur photosynthèse.

Ce travail se présente pour le moment comme un tremplin, un fondement. Pour parvenir à un processus décisionnel, il faudrait tenir compte de tous les aspects du développement durable : environnementaux, sociaux, économiques. L'aspect environnemental étant le seul aspect ici prit en compte, requiert aussi dans la prise de décision avec des résultats plus dynamiques, de mener :

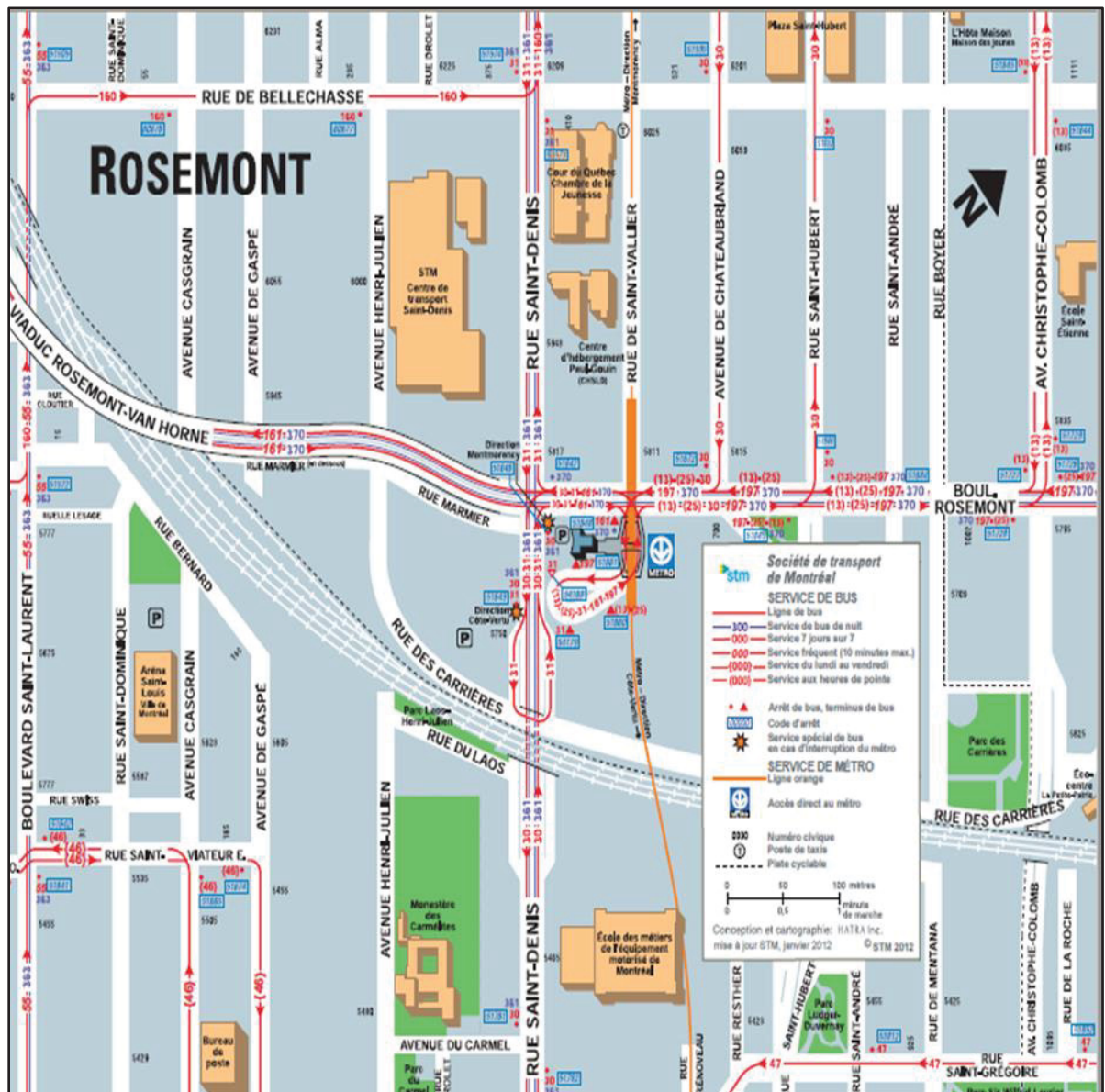
- des études avec des données réelles issues du terrain dans le but de minimiser les incertitudes ;
- d'utiliser des données d'une période de 5 à 10 ans dans le but de représenter un modèle dynamique de précision des émissions de CO<sub>2</sub> ;

- de tenir compte de certains facteurs tels que l'âge réelle des arbres, les caractéristiques techniques des bus (type de moteur, durée de vie du bus etc)



## ANNEXE I

## PLAN DE RÉPARTITION DES LIGNES DE BUS DE LA STM À ROSEMONT



Tirée de (STM, 2017)

2

<sup>2</sup> Société de transport de Montréal : <http://www.stm.info/sites/default/files/rosemont.pdf>



## ANNEXE II

### ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> À TRAVERS LA COMBUSTION DE L'ESSENCE

#### En bref :

- L'essence renferme des atomes de carbone et d'hydrogène. Au cours de la combustion, le carbone (C) du carburant se combine à l'oxygène (O<sub>2</sub>) de l'air pour produire du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Le poids supplémentaire provient de l'oxygène.

#### Les détails :

- L'essence est composée d'hydrocarbures, soit des atomes d'hydrogène (H) et de carbone (C) qui sont liés pour former des molécules d'hydrocarbures (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>). L'air est principalement composé d'azote (N<sub>2</sub>) et d'oxygène (O<sub>2</sub>).

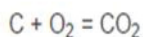
Une équation simplifiée de la combustion d'un carburant d'hydrocarbures peut être exprimée comme suit :

Carburant (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) + oxygène (O<sub>2</sub>) + étincelle = eau (H<sub>2</sub>O) + dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) + chaleur

Dans cette réaction de combustion, nous voyons que l'hydrogène de l'essence se combine avec l'oxygène de l'air pour produire de l'eau (H<sub>2</sub>O). Par ailleurs, le carbone du carburant se combine avec l'oxygène de l'air pour produire du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Le processus de combustion produit également de la chaleur qui est convertie en énergie mécanique pour propulser le véhicule.

**C'est donc l'oxygène de l'air qui augmente le poids des produits d'échappement.**

Maintenant, examinons la réaction du CO<sub>2</sub>. Cette dernière peut être exprimée comme suit :



Le carbone et l'oxygène ont une masse atomique de respectivement 12 et 16, alors que le CO<sub>2</sub> a une masse moléculaire de 44 (un atome de carbone [12] + 2 atomes d'oxygène [2 x 16 = 32]).

Par conséquent, le CO<sub>2</sub> est 3,67 fois plus lourd que le carbone (44 ÷ 12 = 3,67).

Donc, un litre d'essence, qui renferme environ 0,63 kg de carbone, peut produire environ 2,3 kg de CO<sub>2</sub> (3,67 x 0,63 kg = 2,3 kg).

Tirée de (RNCAN, 2017)

---

<sup>3</sup> Resource naturelle Canada : <https://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/transports/voitures-camions-legers/achats/16772>



### ANNEXE III

#### ÉQUATIONS ALLOMÉTRIQUES PRÉDICTIFS DE BIOMASSES SÈCHES

**Tableau 2:** modèles d'équations allométrique prédictifs de la biomasse sèche. Les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ , et  $\beta_4$  sont les paramètres ajustés des modèles. L'erreur standard résiduelle (RSE) et le critère d'information d'Akaike (AIC).

Modél	$\alpha$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	RSE	AIC
1. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D)$	-1,5901	2,4044				0,3383	44,86
2. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D) + \beta_2 \log(D^2)$	-1,5955473	2,4073753	-0,0003997			0,3382	45,79
3. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D) + \beta_2 \log(D^2) + \beta_3 \log(D^3)$	19,6607	-15,3249	4,852	0,4362		0,3338	45,12
4. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D) + \beta_2 \log(\rho)$	-1,18172	2,36747	0,87972			0,2989	30,71
5. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D) + \beta_2 \log(D^2) + \beta_3 \log(\rho)$	-0,85497	2,21274	0,02975	1,23825		0,2979	31,23
6. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D) + \beta_2 \log(D^2) + \beta_3 \log(D^3) + \beta_4 \log(\rho)$	7,9926	-5,1768	2,0524	-0,1819	1,2126	0,2975	32,01
7. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D) + \beta_2 \log(H)$	-3,3789	1,8657	1,1202			0,2946	28,94
8. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D^2 \times H)$	-3,15747	0,97091				0,2945	27,45
9. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D) + \beta_2 \log(H) + \beta_3 \log(\rho)$	-2,3445	2,1192	0,6488	1,0679		0,2692	18,9
10. $\log(B) = \alpha + \beta_1 \log(D^2 \times H) + \beta_2 \log(\rho)$	-2,77454	0,95458	0,69498			0,2669	16,91

Six équations qui tiennent compte d'une part du diamètre et de la densité ont été élaboré et parmi ces modèles, le modèle est le meilleur, avec un AIC de 30,71 et un RSE de 0,2989. Il s'écrit :  $B = \exp \{(-1,18172 \times D^{2,36747} \times \rho^{0,87972}) \times (0,2989^2/2)\}$

$$\rho_{\text{feuilles}} = 0,02 \text{ g/cm}^3$$

Ou B s'exprime en kg, D en cm, H en m et  $\rho$  en g/cm<sup>3</sup> avec

$$\rho_{\text{branches}} = 0,4 \text{ g/cm}^3$$

Tirée de (Moundounga, 2012)

## ANNEXE IV

### MASSES DE BIOMASSES DES ESPÈCES D'ARBRES DE ROSEMONT : UTILISATION DE CALCULATEUR

			Biomasse par essence [kg]				Biomasse totale en (t)			
Espèce	Nombre	Diamètre [cm]	Bois	Écorce	Branches	Feuillage	Bois	Écorce	Branche	Feuillage
Noyer	32	80	2816,38	371,23	841,11	47,75	90	12	27	2
Ginkgo	242	130	10 274,98	1664,84	1341,79	405,25	2487	403	325	98
Févier	1819	90	3408,6	192,72	781,82	234,28	6200	351	1422	426
Frêne	7861	90	3188,72	321,42	1047,83	27,72	25 067	2527	8237	218
Aulne	5	75	1664,97	283,31	1143,64	92,96	8	1	6	0,5
Bouleau	177	40	602,03	95,22	161,75	21,91	107	17	29	4
Acer	8656	35	396,53	59,48	111,33	12,45	3,432	515	964	108
Quercus	570	100	3538,81	314,34	1970,45	70,75	2017	179	1123	40
Peuplier	365	70	2017,35	390,21	370,93	41,98	736	142	135	15
Érable	8652	100	1391,18	143,48	158,91	70,76	12 036	1241	1375	612
Épinette	1661	60	1391,18	143,48	158,91	70,76	2311	238	264	118
Tilleul	1488	100	3718,88	472,69	689,72	54,4	5534	703	1026	81
Lilas	197	40	427,59	82,8	107,86	57,04	84	16	21	11
Pometier	152	50	923,89	131,07	266,4	22,24	140	20	40,5	3,4

			Biomasse par essence [kg]				Biomasse totale en (t)			
Espèce	Nombre	Diamètre [cm]	Bois	Écorce	Branches	Feuillage	Bois	Écorce	Branche	Feuillage
Mélèze	469	40	520,7	41,96	83,54	19,36	244	20	39	9
Amelanchier	103	20	105,17	17,22	28,32	5,02	11	2	3	0,5
Orme	1041	100	5829,03	682,35	930,04	36,52	6068	710	968	38
Pin	3813	60	1088,04	158,8	238,25	79,22	4149	606	908	302
Caryer	54	90	4239,64	492,25	3893,81	129,61	229	27	210	7
Thuya	142	40	228,88	31,06	42,42	29,26	33	4,4	6	4
Cerisier	136	60	1056,52	125,85	298,96	13,02	144	17	41	2
Aubépine	258	130	8906,98	1088,19	2758,3	105,12	2298	281	712	27
Ostryer	24	174	155,31	15,03	39,37	22,28	4	0,4	1	0,5
Poirier	8	50	780,61	146,14	173,84	82,67	6	1	1	1
Chicot	118	40	448,55	53,31	75,46	35,57	53	6	9	4
Sorbier	121	25	178,54	28,23	48,88	7,21	22	3	6	1
Vinaigrier	4	30	275,11	42,27	76,36	9,69	1	0,2	0,31	0,04
Catalpa	258	100	5063,26	853,59	765,56	261,92	1306	220	198	68
Saule	152	40	544,25	79,95	154,34	15,47	83	12	23	2
Sapin	113	100	3417,42	570,85	839,05	183,38	386	65	95	21
Divers	289	25	178,54	28,23	48,88	7,21	52	8	14	2,1

			Biomasse par essence [kg]				Biomasse totale en (t)			
Espèce	Nombre	Diamètre [cm]	Bois	Écorce	Branches	Feuillage	Bois	Écorce	Branche	Feuillage
Total	38 980								18 228,81	2644,04

Tirée de (Données Québec, 2016); (Pare et al, 2013)





## ANNEXE V

### BIOMASSE PRÉDICTIVE D'ÉQUATION ALLOMÉTRIQUE

			Biomasse par essence (kg)		Biomasse totale (t)	
Espèce	Nombre	Diamètre [cm]	Branches	Feuilles	Branches	Feuilles
Noyer	32	80	755,03	68,12	24	2
Ginkgo	242	130	1255,71	398,8 8	304	97
Févier	181 9	90	695,78	70,28	1266	128
Frêne	786 1	90	964, 75	70,28	7584	552
Aulne	5	75	1060, 61	59,96	5	0,3
Bouleau	177	40	78, 67	30,54	14	59
Acer	865 6	35	28,3	21,08	245	183
Quercus	570	100	1887,37	79,38	1076	45
Peuplier	365	70	287,85	50,56	105	18
Érable	865 2	100	75,83	79,39	656	687
Épinette	166 1	60	75,83	48,76	126	81
Tilleul	148 8	100	606,64	79,39	903	118
Lilas	197	40	24,78	22,24	5	4
Pometier	152	50	183,32	46,24	28	7
Mélèze	469	40	83,54	19,36	39	9
Amelanchier	103	20	28,32	5,02	3	0,5
Orme	104 1	100	846,96	79,38	882	83
Pin	381	60	238,25	48,76	908	186

			Biomasse par essence (kg)		Biomasse totale (t)	
Espèce	Nombre	Diamètre [cm]	Branches	Feuilles	Branches	Feuilles
	3					
Caryer	54	90	3810,73	70,28	206	11
Thuya	142	40	42,42	30,54	6	4
Cerisier	136	60	215,88	48,76	29	7
Aubépine	258	130	2675,22	398,88	690	103
Ostryer	24	174	39,37	400,02	1	10
Poirier	8	50	90,76	46,24	1	0,36
Chicot	118	40	75,46	30,54	9	4
Sorbier	121	25	48,88	19,36	6	2
Vinaigrier	4	30	76,36	36,56	1	0,2
Catalpa	258	100	682,48	79,38	176	21
Saule	152	40	154,34	30,54	24	5
Sapin	113	100	755,97	79,38	85	9
Divers	289	25	48,88	19,36	14	6
					15421	2442

Tirée de (Chave et al 2005), (Henry et al 2010), (Vieilledent et al 2012), (Moundounga 2012)

## ANNEXE VI

### DISTANCE PARCOURU DES BUS DE ROSEMONT EN UN PASSAGE

Lignes et points de mesures	Distance mesuré par le traçage sur google map (km)	Distance relevé par google map (km)
13 : Station Rosemont – Rousselot/Jarry	3,2	3,6
25 : Station préfontaine – Station Rosemont	5,2	5,
30 : Station Henri Bourassa – amherst/viger	5,2	5,7
31 : Station Henri Bourassa (millen/henry) – Station Rosemont	6,22	6,8
43 : Saint Vital/Henri Bourassa – Riviere des prairies/Gouin	9,7	10,2
46 : Bernard/De l’Esplanade – Station Laurier Sud (Rivard / Saint Joseph)	1,4	2,2
47 : Station Laurier Sud (Gilford/Berri) – (Laurier/Jeanne d’arc)	3,72	4,2
55 : Station (Saint Laurent / Saint Jacques) – (De Louvain/Saint Laurent)	1,3	1,9
160 : (Vezina/Coolbrook) – (Station Beaubien/De Saint Vallier)	5,9	5,94
161 : (Kildare/Westminster) – Station Rosemont	9,59	10
197 : Station Rosemont – (Station Langelier/Sherbrooke)	7,8	8,1
361 : Station Henri Bourassa – Station Place d’Armes	11,55	12
363 : Stations Place d’Armes (Saint urbain/Viger) – Station Henri Bourassa	11,05	12
370 : Station Honore Beaugrand – (Kildare/Westminster)	18,27	21
	104,97	114,64

Tirée de (STM 2017)

## ANNEXE VII

### NOMBRE DE PASSAGES DES BUS DE LA STM DE ROSEMONT

Nombre de passage - Horaire d'Hiver		Lundi-Vendredi		Samedi		Dimanche*	
Nb jour		60	55	12	11	12	11
Numéro de lignes\Nombre de passage		2015	2016	2015	2016	2015	2016
13		31	29				
25		40	38				
30		118	91	84	92	87	85
31		86	97	68	66	67	81
43		129	153	112	109	116	113
46		57	56				
47		119	137	112	108	97	82
55		269	287	233	248	183	196
160		137	138	125	127	97	109
161		328	311	218	219	190	174
197		301	257	140	122	116	114
361		74	74	42	52	13	13
363		25	25	22	22	13	13
370		11	11	14	14	11	11
Total		1725	1704	1170	1179	990	991

Nombre de passage - Horaire de printemps		Lundi-Vendredi		Samedi		Dimanche*	
Nb jour		57	62	12	13	15	16
Numéro de lignes\Nombre de passage		2015	2016	2015	2016	2015	2016
13		27	27				
25		40	50				
30		87	95	88	99	78	80
31		96	99	63	67	69	74
43		138	144	122	109	112	116
46		56	58				
47		126	137	108	112	95	81
55		260	261	234	241	178	180
160		135	132	138	127	109	100
161		305	300	199	201	176	192
197		275	261	125	121	111	110
361		74	74	56	48	13	13
363		25	25	27	22	13	13
370		11	11	23	14	11	11
Total		1655	1674	1183	1161	965	970

Nombre de passage - Horaire d'été		Lundi-Vendredi		Samedi		Dimanche*	
Nb jour		48	48	10	10	12	12
Numéro de lignes	Nombre de passage	2015	2016	2015	2016	2015	2016
13		31	27			31	
25		39	38	93	87	39	
30		89	105	64	68	89	103
31		90	97	115	109	90	63
43		161	154			161	130
46		55	57			55	
47		112	111	80	91	112	87
55		202	243	212	223	202	174
160		150	113	146	168	150	106
161		263	281	176	170	253	149
197		199	199	113	119	159	122
361		74	74	45	53	74	16
363		25	25	22	22	25	13
370		11	11	17	21	11	11
Total		1501	1535	1083	1131	1501	974

Nombre de passage - Horaire d'automne		Lundi-Vendredi		Samedi		Dimanche*	
Nb jour		86	87	17	18	24	23
Numéro de lignes	Nombre de passage	2015	2016	2015	2016	2015	2016
13		29	27				
25		44	48				
30		85	108	82	96	87	97
31		93	92	64	64	68	63
43		154	151	122	128	118	128
46		56	55				
47		113	126	100	107	110	80
55		250	251	224	235	152	166
160		134	135	151	148	113	113
161		300	327	177	204	151	143
197		249	231	120	129	126	100
361		74	74	48	45	19	13
363		25	25	22	22	18	13
370		25	13	10	15	19	14
Total		1631	1663	1120	1193	981	930

\* Les jours fériés sont considérés comme des dimanche

Tirée de Demande d'accès 0308.2017.076, (STM 2017)

## ANNEXE VIII

### PROPRIÉTÉ PHYSIQUE DE L'HEPTANE ET DE L'ÉTHANOL

Heptane		Éthanol	
Masse molaire	100,21 g/mol	Masse molaire	46,07 g/mol
Densité	0,67595 g/cm <sup>3</sup>	Densité	0,7893 g/cm <sup>3</sup>
Enthalpie de combustion standard	4817 kJ/mol	Enthalpie de combustion	2167 kJ/mol

(Seloua, 2006); (INRS, 2008-2011)





## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2003). « Étude sur les gisements de déchets et sous-produits organiques en région Champagne-Ardenne Synthèse, Biomasse Normandie, Awiplan SARL, Chambre d'Agriculture Régionale de Champagne-Ardenne. » Conseil Régional Champagne-Ardenne, 24 p.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2009). « Méthanisation agricole et utilisation de cultures énergétiques en codigestion Avantages/inconvénients et optimisation. » Rapport final, 130 p.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2010). « Expertise de la rentabilité des projets de méthanisation rurale. » Rapport final, ministère de l'Agriculture et de la pêche. 130 p.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie ADEME (2012a). « Biocarburant : De quoi parle-t-on ? In ADEME. Énergie et matières renouvelables. » Repéré à <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=23697>.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie ADEME (2012 b). « Des qualités techniques et environnementales. » In ADEME. Énergie et matières renouvelables. Repéré à <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=1&cid=96&m=3&catid=23698>.
- Ajanovic Amela, Reinhard Haas (2017). « The impact of energy policies in scenarios on GHG emission reduction in passenger car mobility in the EU-15. » Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 68, Part 2, 1088-1096 p. Repéré à <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.013>
- Anon. 2015. « The Urban Planner's Guide to a Post-COP21 World ». Article Repéré à <https://nextcity.org/features/view/cop-21-agreement-means-for-cities-climatechange>.
- Antoine Leboeuf (2005). « Méthode de calcul de la biomasse aérienne des arbres de peuplements d'épinette noire (Picea mariana) en forêt subarctique à l'aide de la fraction d'ombre sur les images Quickbird et Ikonos. » Maîtrise en lettres et sciences humaines de l'Université de Sherbrooke (UdeS). Repéré à <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/2411>.
- Association des transports du Canada (Transportation Association of Canada) (2004). « Transport urbain et qualité de l'air. » Rapport 10 p. Repéré à <http://tac-atc.ca/sites/tac-atc.ca/files/site/doc/resource/briefing-ut-and-airquality-f.pdf>.

- Audrey Some (2013). « Amélioration des prévisions environnementales de tables entrées/sorties par l'utilisation d'un modèle économique d'équilibre général. » Maîtrise en Sciences appliquées, Université de Montréal-École polytechnique de Montréal, 160p.
- Ballerini Daniel, Alazard-Toux Nathalie (2011). « Les biocarburants : répondre au défi énergétique et environnementaux des transports. » IFP Énergie Nouvelle : Édition TECHNIP, 416 p. ISBN : 9782710809692.
- Bellavance Pierre (2013). « Le biogaz raffiné en biométhane pour les véhicules, un excellent moyen de réduire les GES au Québec. » Mémoire de la Commission sur les enjeux énergétiques du Québec du Gouvernement du Québec, 12 p.
- Blais Pierre. (2004). « Des déplacements moins polluants pour les résidents des grandes agglomérations canadiennes. » Rapport gouvernemental du Ministère des Affaires municipales, du Sport et du Loisir du Canada. Repéré à [http://www.mamrot.gouv.ca/pub/observatoire\\_municipal/veille/deplacements\\_moins-polluants.pdf](http://www.mamrot.gouv.ca/pub/observatoire_municipal/veille/deplacements_moins-polluants.pdf).
- Blais Pierre et Fontaine Nicolas (2012). « Les écoparcs industriels. », ISBN 978-2-550-65617-3, Repéré à [http://www.mamot.gouv.qc.ca/pub/observatoire\\_municipal/veille/ecoparcs\\_industriel](http://www.mamot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/veille/ecoparcs_industriel)
- Brenn Louis (2010). « Avenir du secteur de l'automobile dans un contexte de développement durable : solution durable au moteur à essence. » Maîtrise en Environnement de l'Université de Sherbrooke, 86 p.
- Bronson-Consulting-Group. (2004). The impacts of low-level ethanol blended gasoline use on drivability and vehicular components of on -road vehicles, texte inédit, rapport préliminaire. Transport Canada. Repéré à <https://worldwidescience.org/topicpages/t/throttle+valve+disposed.html>
- Boisvert Marc Olivier Gaudette (2012). « Élaboration d'une démarche visant la réduction des émissions de GES provenant du transport routier au Québec. » Maîtrise en Environnement de l'Université de Sherbrooke, 110 p.
- Canada's national forest inventory: monitoring the sustainability of Canada's forests. 2003. Gillis, M.D.; Brierley, T.; Power, K.; Gray, S.L. Pages 35-36 in Proceedings of the XII World Forestry Congress, September 21-28, 2003, Quebec, Canada. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, Vol. B - Forests for the planet, Co-published by Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, and the Government of Quebec.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2000). « Guides des pratiques de conservation en grandes cultures. », Extrait de guide Repéré à <http://www.agrireseau.ca/agroenvironnement/documents/Le%20semis%20direct.pdf>.

- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2008). « La biométhanisation à la ferme. » Publication n° EVC 033 du CRAAQ, 18 p. Repéré à <http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC033.pdf>.
- Chang, W.R., Hwang, J.J., Wu, W. (2017). “Environmental impact and sustainability study on biofuels for transportation applications.” *Renewable & Sustainable Energy Review* 67, 277–288.
- Charlez, Bayloc (2014). « Gaz et pétrole en schiste. » Éditions Technip Renaud-Bray, 226 p.
- Chen, P., Overholt, A., Rutledge, B. and Tomic, J. (2010). “Economic Assessment of Biogas and Biomethane Production from Manure.” White Paper. In CALSTART. Repéré à [http://www.calstart.org/Libraries/Publications/Economic\\_Assessment\\_of\\_Biogas\\_and\\_Biomethane\\_Production\\_from\\_Manure\\_2010.sflb.ashx](http://www.calstart.org/Libraries/Publications/Economic_Assessment_of_Biogas_and_Biomethane_Production_from_Manure_2010.sflb.ashx).
- Commission des Communautés Européennes (CCE) (2007). « Rapport sur les progrès accomplis en matière d'utilisation de biocarburants et d'autres carburants renouvelables dans les États membres de l'Union européenne. » Repéré à [http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/com/2006/com2006\\_0845fr01.pdf](http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/com/2006/com2006_0845fr01.pdf).
- Conférence Climat Paris (COP21) (2015). « Les principaux chiffres du réchauffement climatique. » Article Repéré à <http://www.cop21.gouv.fr/lesprincipauxchiffresdurechauffementclimatique/>.
- Conférence Climat de Paris (COP21) (2016). « Record : 177 signataires de l'Accord de Paris. » Article Repéré à <http://www.cop21.gouv.fr/unrecordplusde160paysattendusanewyorkle22avrilpoursignerlaccorddeparis/>.
- Connaissance des Énergies (CDE) (2016). « Biocarburants ». Rapport Repéré à <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biocarburant>.
- Duffield James, Michael S, Graboski (1995). “Estimating the net energy balance of corn ethanol” U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Office of Energy. Agricultural Economic Report No. 721. USDA, ERS, 18 p. Repéré à [https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/aer721/32459\\_aer721.pdf](https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/aer721/32459_aer721.pdf)
- Dorin Bruno, Vincent Gitz. (2008). « Écobilans de biocarburants : une revue des controverses. » Article published by EDP Sciences and available at <http://www.nss-journal.org>.
- Douville Ginette, Vincent Vallée, André Proulx, Michet Bouchard, France Brulotte, Jean Baribeault, Marc Giguère, Jean Guy Plasse. (2006). « Profil des produits forestiers – Première transformation – Biomasse forestière résiduelle – Inventaires des méthodes et équipements de récupération ainsi que des systèmes de combustion les plus

courants.» Publication du Centre de Recherche Industriel Québec, Ressources Naturelles et Faune du Québec, 123 p.

Dronne Yves, Agneta Forslund, Hervé Guyomard (2011). « Les biocarburants de deuxième génération et la compétition pour l'usage des terres. » Oilseeds and fats, Crops and Lipids (OCL), Économie—Développement, 8 p. DOI <http://dx.doi.org/10.1051/ocl.2011.0361> , Repéré à [http://www.ocljournal.org/articles/ocl/full\\_html/2011/01/ocl2011181p1/ocl2011181p1.html](http://www.ocljournal.org/articles/ocl/full_html/2011/01/ocl2011181p1/ocl2011181p1.html).

Drouin-Deziel Nicolas, Jie He, Luc Savard (2009). « La Chine et le contrôle des émissions de CO<sub>2</sub> : Analyse en équilibre général calculable. » Groupe de Recherche en Économie et Développement International [GREDI], Cahier de recherche, Département d'Économie de la Faculté d'administration à l'Université de Sherbrooke, 28 p.

Environnement et Changement climatique du Canada (2015). « Facteurs d'influence et impacts de la pollution atmosphérique. » Article Repéré à <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=D189C09D-1>.

Essam Almansour, Bonnet Jean-François, Heredia Manuel, (2011) « Potentiel de production de biogaz à partir de résidus agricoles ou de cultures dédiées en France », Revue de Sciences Eaux & Territoires, p. 64-72.

Ethanol Greenfield (2010). « Emplacements. In Ethanol Greenfield. L'énergie de la nature. » Repéré à <http://www.greenfieldethanol.com/>

Fagnen Shirley (2009). « Analyse du cycle de vie axée sur les conséquences d'un biocarburant de 2<sup>e</sup> génération à base de Saule. » Maîtrise en Sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, 147p.

Filiatreault, Y. (2015). « Changements climatiques et îlots de chaleur : indicateurs de performance pour les mesures d'adaptation. » Maîtrise de la Gestion de l'Environnement de l'Université de Sherbrooke, 93 p

Gallant Stephanie (2006). « Biodiesel : un carburant qui tarde à s'implanter au Québec. » Agence Sciences Presse (ASP), 4 p. Repéré à <http://www.sciencepresse.qc.ca/actualite/2006/07/04/biodiesel-carburant-tarde-simplanter-quebec>.

GIEC (2014). Rapport de synthèse « Résumé à l'intention des décideurs sur le Changement climatique » Repéré à [https://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM\\_fr.pdf](https://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_fr.pdf) , 33.

Girouard R.M (1982). « Greenhouse production of white spruce, black spruce, jack pine and red pine seedlings in three types of containers. » Information Report LAU-X-57E

Environment Canada, Canadian Forestry Service, Laurentian Forest Research Centre, Sainte-Foy, Quebec, 14 p.

Herbert Josianne (2011). « Quel avenir pour le développement du biocarburant de deuxième génération ? » Maîtrise en Environnement de l'Université de Sherbrooke, 103 p

Hess Jonathan (2007). « Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. Automatique/Robotique. » Doctorat à l'Université Nice Sophia Antipolis, 229 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). « Exit based on global emissions from 2010. » Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Details about the sources included in these estimates can be found in the Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment

Irisbus Ivico, Société de transport de Montréal, Réseau de transport de Longueuil, Société de gestion et d'acquisition des véhicules de transport (2013) « Rapport d'essais de l'autobus articulé hybride citelis d'Irisbus Iveco. » Rapport, Repéré à [http://www.stm.info/sites/default/files/affairespubliques/Communiqués/Annexes/rapport\\_essais\\_iveco.pdf](http://www.stm.info/sites/default/files/affairespubliques/Communiqués/Annexes/rapport_essais_iveco.pdf)

International Energy Agency, “CO2 emissions from fuel combustion”, publishing article 2007 Edition

International Energy Agency, “World Energy Outlook, China and India's insights”, publishing article 2007 Edition

International Energy Agency, “China's worldwide quest for energy”, publishing article 2000

International Energy Agency, “Developing China's natural gas market”, publishing article 2002

JEDWAB Jack. (2004). “Getting to Work in North America's Major Cities and Dependence on Cars” Montréal, Rapport de l'Association d'études Canadiennes, 7 p. Repéré à <http://www.acs-aec.ca/Polls/locomotions.pdf>.

Kpogbemabou David (2011). « Procédé de fabrication de biocarburants à partir de biomasse lignocellulosique biologiquement structurée. » Doctorat en Sciences de l'environnement à l'Université de Poitiers, 230 p.

Landrieu Guy (2014). « Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement. » HAL, Id : ineris-00971900 . Revue Repéré à <https://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00971900>

Langlois Mathieu, Karinne Boneville, et autres (2004). « La réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'aménagement du territoire. » Guide de bonnes pratiques, publication

gouvernementale du Ministère des Affaires municipales du Sport et du Loisir, Dépôt légal à la Bibliothèque nationale du Canada 71 p. Repéré à [http://www.mamot.gouv.ca/pub/amenagement\\_territoire/guide\\_reduction\\_gaz](http://www.mamot.gouv.ca/pub/amenagement_territoire/guide_reduction_gaz)

Lazar Aguiar, Evelyn Sorel, Danielle Inkel (2011). «Évaluation du potentiel de production de biogaz par la méthanisation de la biomasse agricole dans la région de Saint-Jean-Valleyfield.» Rapport final de la Fédération régionale de l'Union des Producteurs Agricoles de Saint-Jean-Valleyfield, 147 p.

Loi de Règlement Québécois (LRQ) (2016). «Loi sur la qualité de l'environnement.» Publication Québec Légis, sources officielles. Rapport Repéré à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showDoc/cs/Q-2?&digest=>, 150.

Maamri Rachid (2014). «Modélisation et expérimentation des moteurs à combustion fonctionnant avec différents carburants de substitution et mélanges.» Thèse de doctorat en Ingénierie Université du Québec à trois-Rivières, 286 p.

Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN) (2016). «Consommation de produits pétroliers énergétique.» 3 p. Article Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-petroliers.jsp>,

Navar Jose (2008). «Biomass component equations for Latin American species and groups of species.» Natural Resource Management, CIIDIR-IPN Unidad Durango, Calle Sigma s/n. Fraccionamiento, c INRA, EDP Sciences, 2009. Article Repéré à [www.afs-journal.org](http://www.afs-journal.org). DOI : 101,051/forests/2,009,001. 8 p

Penner. M, Power. K, Muhairwe. C., Tellier. R., Wang. Y (1997). «Canada's forest biomass resources: Deriving estimates from Canada's forest inventory.» Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC. Information Report BC-X-370. 33 p.

Pereira Andre Santos (2005). «Développement et Changement climatique.» Passages de Paris, APEB, pp.225-237. Article repéré à <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00007170>.

Petit Michel (2016). «Le changement climatique dû aux activités humaines.» Livret sur l'environnement, Académie des sciences de l'Institut de France, 15 p. Repéré à [http://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/livret2013\\_1.pdf](http://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/livret2013_1.pdf).

Pinard Eric (2011). «Mise en valeur du biogaz des usines de biométhanisation de Montréal : perspectives, analyses et recommandations.» Maîtrise de la Gestion de l'Environnement de l'Université de Sherbrooke, 112 p.

Poluga Gabriel (2011). «Réduction des émissions de GES du transport routier des personnes dans les municipalités québécoises : comparaison de méthodologies de quantification pour



assurer un suivi et rendre compte des efforts.» Maîtrise en Environnement du Centre de formation Universitaire en Environnement, Université de Sherbrooke, 133 p.

Rapport d'activité Société du Transport de Montréal (STM) (2013). « Façonner aujourd'hui: la mobilité de demain. » Repéré à <https://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/ra2013.pdf>.

RECY-QUEBEC (2017). « Plan de gestion des matières résiduelles, MRC de Coaticook, Estrie. » Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/municipalites/matieres-organiques/residus-verts/exemples-gestion-municipale/mrc-coaticook#cots-de-collecte-transport-et-traitement>.

RECY-QUEBEC (2017). « Guide pour les options de collectes. » <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/municipalites/matieres-organiques/residus-verts/documents-outils-pratiques-planification/guide-options-collecte>.

Renjie Chen, Haidong Kan, Bingheng Chen, Wei Huang, Zhipeng Bai, Guixiang Song, Guowei Pan (2012) « The China Air Pollution and Health Effects Study » On Behalf of the CAPES, Association of Particulate Air Pollution With Daily Mortality, Collaborative Group Am J Epidemiol, 1173-1181 p. Doi: 10.1093/aje/kwr425.

Ou, Zhang, Chang, Guo (2009). « Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China. » Applied Energy, Vol 86, 197-208 p. Doi:10.1016/j.apenergy.2009.04.045.

Routhier (1981). « Implications de l'exploitation par arbres entiers pour la récupération de la biomasse. » Environnement Canada, Service canadien des forêts, Centre de recherches forestières des Laurentides, Sainte-Foy (Québec). Rapport d'information LAU-X-50.

Sandén, & Karlström (2007). « Positive and negative feedback in consequential lifecycle assessment. » Journal of Cleaner Production, 15 (15), 1469-1481p.

Sbughea Corina (2016). « Simulation of the Production Process Dynamics using Vensim and Stella. » Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati Fascicle I. Economics and Applied Informatics – no1/2016, ISSN-L 1584-0409 ISSN-Online 2344-441X. Repéré à [www.eia.feaa.ugal.ro](http://www.eia.feaa.ugal.ro).

Schmidt (2008). « System delimitation in agricultural consequential LCA. » The International Journal of Life Cycle Assessment, 13 (4), 350-364p.

Schmidt & Weidema (2008). Shift in the marginal supply of vegetable oil. The International Journal of Life Cycle Assessment, 13 (3), 235–239. Searchinger, Heimlich, Houghton, Dong, Elobeid, Fabiosa, et al. (2008). Use of U.S. Croplands for Biofuels

Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319 (5867), 1238-1240p.

SNC-Lavalin, Solinov et Ciriaig (2007). « Étude comparative des technologies de traitement des résidus organiques et des résidus ultimes applicables à la région métropolitaine de Montréal. Rapport final présenté à la Communauté Métropolitaine de Montréal. » Repéré à [http://www.cmm.ca/fileadmin/user\\_upload/documents/Etude\\_Technologies\\_GMR](http://www.cmm.ca/fileadmin/user_upload/documents/Etude_Technologies_GMR) PM

Tang Lichun, Li Jiayu (2011). « Simulation analysis of bullwhip effect in logistics service supply chain based on Vensim. » International Conference on Management and Service Science (2011-08-24 en Chine), p 4 pp.

Terix Envirogaz (2013). « Le biométhane liquéfié : une solution durable pour le camionnage lourd au Québec. » Commission sur les enjeux énergétiques du Québec. De la réduction des GES à l'indépendance énergétique du Québec, 10 p.

Terrier Philippe (2005). « Influence de l'utilisation du biocarburant E85 sur les émissions polluantes d'un véhicule hybride électrique. » Mémoire de l'Ecole de Technologie Supérieur, 132 p.

Tvinnereim, Liu, & Jamelske (2017). « Climatic Change. » 140 : 399. doi:10.1007/s10584-016-1871-2. Revue repéré à <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1871-2>.

Turnock. and Wise (2004). "Density and survival of Lady Beetles (Coccinellidac) in overwintering sites in Manitoba." *Canadians Field-Naturalist* 309–317 p.

Ronel Adrien (2011). « Contexte, impacts et débats autour de la production d'agrocarburants versus le droit à l'alimentation. », Maîtrise à l'Université de Sherbrooke, 120 p.

Ville de Montréal (2009 b). « Réduire pour mieux grandir. » Plan directeur de gestion des matières résiduelles 2010-2015. In ville de Montréal. Repéré à [http://ville.montreal.ca/pls/portal/docs/ENVIRO\\_FR/MEDIA/DOCUMENTS/pdgm\\_r\\_2010\\_2014\\_fr](http://ville.montreal.ca/pls/portal/docs/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/pdgm_r_2010_2014_fr).

Wided Chourou (2014). « Développement et évolution des modèles hauteur-diamètre des pins gris et des épinettes noires à l'échelle provinciale et éco-régionales de l'Alberta et du Québec. », Maîtrise à l'Université du Québec à Montréal, 81 p.